

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніка

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____
(код і назва)

на тему: Температурні та частотні властивості п'єзоелектричних кристалів германо- і силіко-силіценів.

Виконала: студентка 6 курсу, групи ДП-82мп
Немирович Олександра Андріївна

(підпис)

Науковий керівник проф., д.ф.-м.н., проф. Поплавко Ю.М.

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т.

(підпис)

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Реферат

Дипломна робота налічує 86 сторінок, 5 розділи, 24 ілюстрації, 29 таблиці та 75 джерел за переліком посилань.)

Актуальність теми.

В даний час мікроелектронні пристрої надвисоких частот (НВЧ) визначають у великій мірі технічну та економічну ефективність систем радіозв'язку, радіолокації і радіонавігації.

Електрооптичні і п'єзоелектричні властивості кристалів класу сілленіта є основою для виготовлення оптоелектронних приладів, пристроїв запису і зберігання інформації, просторово тимчасових модуляторів світла, що робить дослідження цих властивостей безумовно актуальними.

Монокристали зі структурою типу сілленіта, узагальнену форму яких можна представити у вигляді $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20}$ відносяться до просторової групи 123. Кристали $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20}$ володіють унікальною різноманітністю фізичних властивостей - електрооптичних і п'єзоелектричних ефектами, значною фотопроводимістю у видимій та ближній ІЧ-областях спектра, високими показниками заломлення, широкої областю прозорості, оптичною активністю і фоторефракцією поєднання яких дозволяє використовувати їх в пристроях оптичної обробки та зберігання інформації, голографічної інтерферометрії в реальному часі, П'єзотехніка, акустoeлектроніці, акустооптиці і для вирішення інших прикладних задач.

Проведені протягом останніх років інтенсивні дослідження і розробка нових складів діелектриків з великою діелектричною проникністю дозволили створити і впровадити в техніку НВЧ цілий ряд високоефективних твердотільних частотно - виборчих пристроїв НВЧ на діелектричних резонаторах.

П'єзоелектричні матеріали використовують при у складі різноманітних електронних пристроїв, що використовуються для побутового та промислового застосування, такі як ультразвукові п'єзоелектричні перетворювачі, датчики, пускачі, трансформатори та резонатори.

Тому поліпшення характеристик пристроїв, що використовують сілленіта, в значній мірі пов'язано з отриманням і дослідженням як нових монокристалів зі структурою типу сілленіта, так і з цілеспрямованою зміною властивостей вже вивчених кристалів за рахунок легування.

Мета і задачі дослідження.

Метою даної роботи є дослідження дослідження ϵ и $\text{tg}\delta$ сіленітів як нижче, так и вище частот п'єзореzonансів. Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Провести аналіз діелектричних характеристик сілленітів високочастотних НВЧ.
2. Дослідження частотних та температурних залежностей ϵ и $\text{tg}\delta$ монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ на частоті 9.6 ГГц.
3. Дослідження температурних залежності діелектричних втрат монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ на частоті 9.7 ГГц та 20 ГГц.

Об'єкт дослідження: германо-і сілікосіленіти.

Предмет роботи: дослідження надвисокочастотних діелектричних характеристики сіленітів методом діелектричного резонатора .

Методика наукового дослідження : методом діелектричного резонатора – на зразках циліндричної форми з основним TE_{018} типом коливань у стандартних прямокутних хвильоводах.

Практичне значення одержаних результатів: Як показують наші дослідження, сіленіти являють собою перспективні для НВЧ застосувань діелектрики, на основі яких може бути розроблено електрично керований діелектричний резонатор.

Апробація результатів магістерської дисертації проводилась на научно-технічній конференції ELNANO та публікації наукової статті, що зазначена нижче.

Немирович О.А., Силеніти як діелектричні матеріали з низьким поглинанням НВЧ/ научно-технічна конференції ELNANO.

Ключеві слова: П'єзоелектричні кристали, монокристали, діелектричний резонатор, сілленіти, НВЧ.

ABSTRACT

The work presented on 86 pages consists of 5 parts, 24 figures, 29 tables and 75 sources in the list of references.

Actuality of theme.

Now microelectronic devices of ultrahigh frequencies (microwave oven) define to a large extent technical and cost efficiency of systems of a radio communication, radar-location and radio navigation.

Electrooptical also drinks piezoelectric properties of crystals of a class of the sillenitis is a basis for production of optoelectronic devices, devices of record and storage of information, spatially temporary modulators of light that does researches of these properties certainly relevant.

Single crystals with a structure of the type of sillenite, the generalized form of which can be represented in the form of $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20}$ belong to the spatial group 123. The crystals of $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20}$ have a unique variety of physical properties-electro-optical and piezoelectric effects, significant photoconductivity in the visible and near range, wide transparency, optical activity and photorefraction of the combination of which allows to use them in devices for optical processing and storage of information, holographic and real-time interferometry, piezoelectric engineering, acoustoelectronics, acousto-optics and for solving other applied problems.

Intensive researches are conducted in recent years and development of new warehouses of dielectrics with big dielectric permeability allowed to create and introduce in the microwave oven equipment a number of the microwave ovens highly effective solid-state frequency-selective devices on dielectric resonators.

Piezoelectric materials are used in the composition of various electronic devices used for domestic and industrial applications, such as ultrasonic piezoelectric transducers, sensors, actuators, transformers and resonators.

Therefore, the improvement of the characteristics of devices using sillenite, is largely due to the receipt and study of both new single crystals with the structure of the type of sillenite, and the purposeful change of the properties of the already studied crystals due to doping.

The purpose and objectives of the study.

The purpose of this study is to investigate the study of ϵ and $\text{tg}\delta$ selenites both below and above the frequency of piezoresonances. To achieve this, you must do the following tasks:

1. To analyze the dielectric characteristics of high-speed microwave sillenites.

2. Investigation of frequency and temperature dependences of ϵ and $\text{tg}\delta$ single crystals of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ at 9.6 GHz.

3. Investigation of the temperature dependences of dielectric losses of single crystals $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ at the frequency of 9.7GHz and 20GHz.

Object of study: Germanic and silicosilenites.

Subject of work: study of high-frequency dielectric characteristics of silenites by the method of dielectric resonator.

Methods of scientific research: by the method of dielectric resonator - on samples of cylindrical shape with basic $\text{TE}_{01\delta}$ type of oscillations in standard rectangular waveguides.

Practical significance of the results obtained: As shown by our studies, silenites are promising for microwave applications of dielectrics, on the basis of which an electrically controlled dielectric resonator can be developed.

The results of the master's thesis were validated at the ELNANO scientific and technical conference and the publication of the scientific article below. Nemurovich O.A, Silenites as dielectric materials with low microwave absorption / ELNANO scientific and technical conference.

Keywords: piezoelectric crystals, single crystals, dielectric resonator, silenites, microwave.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. КЛАСИФІКАЦІЯ КЕРОВАНИХ ПРИСТРОЇВ НВЧ.....	9
1.1 Стан проблеми.....	11
1.2 Особливості використання п'єзоефекту для управління характеристиками НВЧ пристроїв.....	16
1.2.1 П'єзо-і електрострікційні актюатори та матеріали.	20
1.3 Діелектричні резонатори в керованих пристроях НВЧ.....	32
1.4 Основні принципи реалізації НВЧ- пристроїв на діелектричних резонаторах...	45
1.5. Перестроювання резонансних частот діелектричних резонаторів.....	50
2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ П'ЄЗОЕЛЕКТРОНІКИ.....	54
2.1 П'єзоелектричні кристали.....	56
2.2 П'єзоелектричні матеріали.....	57
2.2.1 Чому п'єзоелектричні матеріали цікаві?.....	60
3. МОНОКРИСТАЛИ.....	61
3.1 Роль монокристалів у створенні нових матеріалів.....	62
3.2 Властивості п'єзоелектричних кристалів $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) та $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO).....	65
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛІВ ГЕРМАНО-І СИЛІКОСЕЛЕНІТІВ.....	67
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	78
5.1. Опис ідеї проекту.....	78
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	79
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	84
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

ВСТУП

У дійсний час мініатюризація коливальних систем надвисоких частот базується, головним чином, на використанні діелектриків із високою проникністю у якості середовища передачі енергії НВЧ.

Більше перспективні з точки зору мініатюризації електродинамічні системи з повільними хвилями, хвилеведучі і коливальні властивості яких виникають завдяки явищу внутрішнього відображення на кордоні діелектриків з різними значеннями діелектричної проникності. До них відносяться діелектричні хвилеводи (ДВ) і ДР. Для поширення електромагнітних хвиль в ДВ і тривалого існування коливань в ДР не потрібно металевих напрямних або відбивних поверхонь - основного джерела втрат в НВЧ хвилеводних і коливальних системах. Збільшуючи діелектричну проникність матеріалу ДР, можна зменшити їх габарити в 100-1000 разів без збільшення втрат потужності і зниження власної добротності.

Перебудова частоти - належність у тій чи іншій мірі більшості НВЧ генераторів і цілого ряду частотно-селективних НВЧ пристроїв, атенуаторів, фазообертачів. Діапазон перебудови частоти і її особливості визначаються або функціональними вимогами до НВЧ пристрою, або технологічною необхідністю при виготовленні НВЧ пристроїв для настроювання на необхідну частоту. При цьому перебудова частоти можлива, як за рахунок зовнішнього впливу (світло, температура та інше.), так і внаслідок регулювання особистих частот коливальної системи пристрою.

Велика кількість існуючих на сьогоднішній день принципів перебудови резонансної частоти та інших параметрів коливальних систем НВЧ пристроїв указує на важливість та невирішеність проблеми. Серед механічних, електричних і комбінованих методів перебудови частоти можна нарахувати близько двадцяти основних принципів, не враховуючи різні варіанти реалізації принципів перебудови частоти.

Резонансні фільтруючі структури на основі діелектриків з високою проникністю у великій мірі відповідають вимогам НВЧ технологій. Однак такі пристрої пасивні за своєю природою тому отримання на їх основі пристроїв з керованими характеристиками неможливе без створення нових конструкцій діелектричних резонансних систем, без розв'язання проблеми керування їх резонансними частотами при збереженні високої добротності коливальної системи. Можливими шляхами вирішення цих проблем є використання складних резонансних структур, розробка спеціальних конструкцій,

пошук нових матеріалів, а також нетрадиційне використання вже відомих матеріалів і приладів.

Роботи по дослідженню резонансних ефектів в діелектриках з великою діелектричною проникністю почалися більше 40 років тому. Експерименти з титанату стронцію і рутилом показали можливість створення мініатюрних діелектричних резонаторів, які завдяки внутрішньому віддзеркаленню майже не витрачають енергію на випромінювання, а їх власна добротність може досягати 10 000 і більше. Однак дуже скоро виявилось, що такі діелектричні резонатори навіть з дуже високою добротністю неможливо використовувати для створення високоефективних малогабаритних радіоелектронних систем внаслідок температурної нестабільності. Для їх стабілізації необхідні термостати і кріостати.

1. КЛАСИФІКАЦІЯ КЕРОВАНИХ ПРИСТРОЇВ НВЧ

Керуючі пристрої дозволяють регулювати амплітуду і фази сигналів НВЧ або змінювати шлях їхнього проходження в трактах. У механічних керуючих пристроях зміна параметрів передачі сигналів відбувається внаслідок переміщення окремих частин пристрою. В електричних керуючих пристроях параметри тракту змінюються без будь-яких переміщень його частин під прямим впливом електричних сигналів управління. Електрично керовані пристрої можуть бути виконані на комутаційних діодах НВЧ, подмагнічених ферритах, газових розрядниках і сегнетоелектричних елементах[1].

В даний час розроблені різні передавачі, які можна класифікувати за такими основними ознаками:

- за типом генераторних приладів: на електровакуумних тріодах і тетродах, клістродах, магнетронах, лампах що біжить (прямий) і зворотної хвилі, напівпровідникових приладах і т. д. ;
- за призначенням: зв'язкові, телевізійні, радіолокаційні, навігаційні, телеметричні, систем телеуправління; використовувані в технологічних цілях, в медицині, фізиці, хімії; для передачі електроенергії;
- за діапазонами хвилі: передавачі метрових, дециметрових, сантиметрових і міліметрових хвилі;
- по потужності, що віддається в антену: передавачі малої, середньої та великої потужності;
- по виду модуляції: з амплітудною, імпульсною, частотною, фазовою, амплітудно-імпульсною, частотно-імпульсною, фазо-імпульсною, широтно-імпульсною модуляцією;
- по мобільності: стаціонарні, пересувні (бортові), переносні.

Слід зауважити, що кожна класифікаційна група передавачів має певну сукупність загальних особливостей і може бути предметом самостійного розгляду. У даній книзі матеріал викладено в відповідно до першої ознаки[1].

До передавачів пред'являють цілий комплекс вимог, які обумовлені їх використанням в різних цілях.

Електричні вимоги:

1. Робоча частота (довжина хвилі), робоча смуга частот, діапазон частот, які визначаються призначенням приладу.

2. Стабільність частоти. Для передавачів, які використовуються в інформаційних цілях, стабільність частоти повинна бути високою. Для передавачів, які використовуються в технологічних, енергетичних цілях, ця вимога не є настільки жорстким.

3. Вихідна потужність передавача. Значення цієї величини лежать в межах від часток ватів до тисяч кіловат в безперервному і до сотень мегават в імпульсному режимах.

4. Промисловий коефіцієнт корисної дії (к. П. Д.). Його значення коливаються від часток відсотка до 80%, причому к. П. Д. повинен бути тим більше, чим більше потужність передавача або чим жорсткіші вимоги пред'являються до економічності його харчування (наприклад, в бортовій апаратурі).

5. Вид модуляції, діапазон модулюючих частот. Ця вимога визначає спектр частот електромагнітних коливань радіопередавача.

6. Рівень внеполосного випромінювання. Кожен передавач крім основних генерує коливання, які абсолютно не потрібні для його роботи і можуть з'явитися перешкодами для іншої апаратури. Рівень такої генерації повинен бути невеликим.

Спеціальні вимоги

У передавачах з імпульсною модуляцією (радіолокаційні, радіонавігаційні, телеметричні) необхідна певна форма імпульсів, хороша стабільність їх параметрів. У телевізійних передавачах повинен бути рівномірним амплітудно-частотна характеристик і т.д.

Конструктивні вимоги

Передавачі повинні мати певні габарити, масу, бути вібро-, ударо-, волого-, пило- та теплостійкими і т. Д.

Експлуатаційні вимоги

Ці вимоги визначають такий важливий параметр, як надійність роботи передавача, пристрій органів його управління, систему блокування і сигналізації.

З кожним роком до передавачів, як і до радіоелектронного обладнання в цілому, пред'являють все нові і більш жорсткі вимоги. Так, наприклад, в зв'язку з освоєнням космічного простору виникла необхідність розширення температурного діапазону, підвищення вібростійкості, ударостійкості. З'явилися нові вимоги щодо забезпечення радіаційної стійкості, грібкостійкості і т. Д. Необхідністю передавати все більший обсяг інформації на дуже великі відстані обумовлено вимога розширити робочу смугу частот, збільшити потужність радіопередавача при високій стабільності частоти генерованих коливань і т. Д.

Залежно від виконуваних функцій можна виділити наступні керуючі пристрої НВЧ.

Вимикачі-чотириполіусники, що забезпечують або узгоджену передачу сигналу з входана вихід, або відсутність передачі сигналу. Режим замикання може бути реалізований шляхом або повного відображення сигналу, або його поглинання.

Коммутатори- багатополіусника, що мають один або кілька входів і ряд виходів. Сигнали, подані на входи, надходять по одному або декільком змінним і при виконанні умов узгодження.

Відбивні фазообертач - двухполіусники з регульованою фазою коефіцієнта відбиття при модулі коефіцієнта відбиття, близькому одиниці. В ідеалі відображальний фазообертач є змінне реактивне опір і може бути реалізований у вигляді короткозамкнутого або разомкнутого шлейфу змінної довжини.

Прохідні фазообертачі- узгоджені чотириполіусники, в ідеалі реактивні, що володіють змінною фазою коефіцієнта передачі. Прохідні фазообертачі бувають плавними і ступінчастими, в яких фаза приймає ряд фіксованих значень, що розрізняються на постійну величину, $\Delta\varphi$ - дискрет фази.

Атенюатори-чотириполіусники, що забезпечують плавне або дискретне змінюється ослаблення від мінімального значення L_{\min} до максимального значення L_{\max} .

Обмежувачі потужності-саморегулюючі узгоджені чотириполіусники, пропускають слабкі сигнали майже без ослаблення і різко обмежують інтенсивність сигналів, потужності яких перевищує заданий пороговий рівень.

1.1 Стан проблеми

У дійсний час мініатюризація коливальних систем надвисоких частот базується, головним чином, на використанні діелектриків із високою проникністю у якості середовища розповсюдження енергії НВЧ.

Більшість мікрохвильових систем розташовано у діапазоні 300 МГц - 30 ГГц, як це показано на Рис.1.1 наведеного у роботі [2]. Найважливіший компонент будь кого пристрою зв'язку - фільтр, що виділяє необхідні частоти і блокує усі інші.

Приблизно до 1970р. для цих цілей використовувались коаксіальні та об'ємні металеві резонаторні фільтри, зроблені з інвару. Розробка спеціальних термостабільних, високочастотних діелектриків та резонансних пристроїв на їх основі, зробили можливим мініатюризацію комунікаційного обладнання, за рахунок високої діелектричної проникності (ϵ), Табл. 1.1.

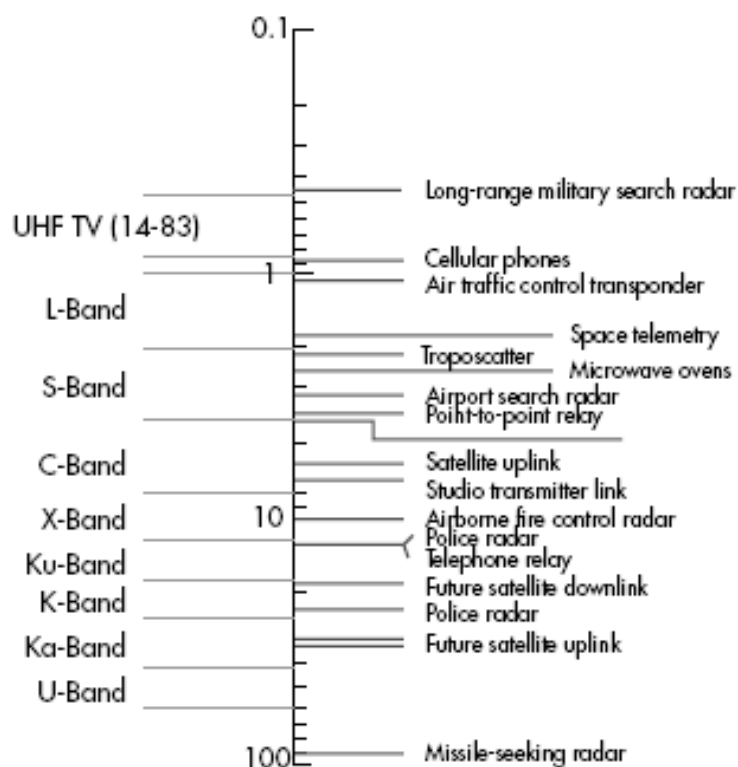


Рисунок 1.1 - Схематичне зображення мікрохвильових діапазонів та їх використання.

Основною галуззю застосування високодобротних термостабільних діелектричних НВЧ матеріалів з високої проникністю є резонансні діелектричні елементи. Типовими застосуваннями таких діелектричних елементів є частотно-виборчі структури: широкий клас НВЧ фільтрів, частотно-поділяючі прилади, дуплексири і мультиплексири, дуплексири, НВЧ генератори, частотні і фазові маніпулятори, змішувачі, антенні прилади, приймально-передаючі модулі, НВЧ датчики для виміру температури, тиску, вологості та інше.

Використовуемі Властивості	Співвідношення (у першому наближенні)	Одержуваний ефект
Висока діелектрична проникність	$L = \frac{L_0}{\sqrt{\epsilon}}$ $S = \frac{S_0}{\epsilon}$ $V = \frac{V_0}{\epsilon^{2/3}}$	Габарити вага пристрою.
Малі діелектричні втрати	$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q}$	Висока добротність.

Завдана залежність ε від температури.	$Tkf = -\frac{1}{2}Tk\varepsilon + Tkl$	Температурна стабільність резонансної частоти
Висока відтворюваність характеристик.		Спрощення конструкції, зведення до мінімуму підстроечних елементів, зниження вартості.

Таблиця 1.1 - Властивості НВЧ діелектриків та ефект від їхнього використання.

Нині відомо понад п'ять десятків композицій діелектриків з задовільними для НВЧ застосувань характеристиками. В світовій практиці розроблення та виготовлення мікрохвильових приладів в основному використовується 5-6 базових діелектриків. Це алюмооксиди, цирконій-станумові, барій-тітанові, барій-лантаноїдні композиції, складні перовскітні діелектрики типу $A(B' B'')TiO_3$, (де A -Ba,Sr; B' -Mg,Mn,Zn,Sn; B'' -Nb,Nd,Ta).

Ці діелектрики мають відповідні характеристики для використання їх у діапазоні частот від сотень мегагерц до сотень гигагерц. Тим не менше, триває інтенсивний пошук нових композицій та технологій, що володіли б кращими характеристиками або були б дешевше, оскільки у виборі діелектрика окрім електричних характеристик важливим моментом є економічна доцільність застосування того або іншого матеріалу.

Останні роки інтенсивно розвивається напрямок багатошарових або пакетних конструкцій НВЧ пристроїв на основі нової, так званої LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics Technology)[3,4]. Власне по розділам ця технологія не нова, бо пакетні НВЧ конструкції відомі і використовуються, а спікання в єдиному циклі багатошарових керамічних пакетів разом з електродами здавна використовується у керамічному конденсаторобудуванні. Головна коштовність LTCC технології, що поставило її в ряд нових, це надзвичайно вдале об'єднання двох відомих методів і вельми вагоме доповнення – використання, спеціально розроблених діелектриків із низькою температурою спікання. Останнє дозволило замінити платинові і палладієві провідникові матеріали, на більш дешеві - срібло, мідь, нікель, що мають більшу провідність. Що у свою чергу, дуже істотно. Усі переваги LTCC технології вагомо виявляються у розробках мобільних приладів і пристроїв зв'язку, де мікромініатюризація органічно необхідна. Відомо, що на друкованих платах до 75% загальної площі зайнято пасивними компонентами. Одна з можливостей зменшення цієї площі це інтеграція в багатошаровій структурі. Це може бути зроблено у LTCC технології, в котрій металізація методами трафаретного друку наноситься на сирий керамічний лист. Листи збирають в пакет, прокатують на вальцях і спікають. Температура спікання, звичайно, не більше 9500С, що дозволяє

використовувати срібло або мідь. Товщина отриманих провідників біля 10 мікрометрів, що складає приблизно три скіншара на 1 ГГц. LTCC технологія винятково підходить для планарних високодобротних індуктивностей та резонаторів, а також планарних резисторів. Не зважаючи на те, що проникність LTCC кераміки, звичайно 6-10, ємності можуть бути створені в багатошаровій структурі. У світовій практиці інтенсивно провадяться пошукові дослідження з метою одержання високодобротних діелектриків з високою проникністю та низкою температурою спікання, а також складів металевих паст з високою провідністю.

Резонансні фільтруючі структури на основі діелектриків з високою проникністю у великій мірі відповідають вимогам НВЧ технологій. Однак такі пристрої пасивні за своєю природою тому отримання на їх основі пристроїв з керованими характеристиками неможливе без створення нових конструкцій діелектричних резонансних систем, без розв'язання проблеми керування їх резонансними частотами при збереженні високої добротності коливальної системи. Можливими шляхами вирішення цих проблем є використання складних резонансних структур, розробка спеціальних конструкцій, пошук нових матеріалів, а також нетрадиційне використання вже відомих матеріалів і приладів.

Серед НВЧ систем найбільше розповсюдження мають мікрострічкові лінії (МСЛ) передачі і резонансні елементи на цій основі, їх конструкція дозволяє використовувати масову інтегральну технологію. Однак коливальні системи на МСЛ за особистою добротністю поступаються хвильовим і коаксіальним системам, але значно виграють по масогабаритним і ціновим показникам. Більш високою добротністю володіють коливальні системи, побудовані на основі діелектричних хвильоводів (ДХ) і діелектричних резонаторів (ДР). Для розповсюдження енергії НВЧ у ДХ не потрібно металевих направляючих або відбиваючих поверхонь, котрі являються головним джерелом втрат надвисокочастотної енергії. Таким чином властивості діелектричних матеріалів багато в чому визначають експлуатаційні характеристики НВЧ пристроїв.

Регулювання резонансної частоти у процесі виготовлення або експлуатації НВЧ приладів, зараз здійснюється механічними або електромеханічними засобами, в тому числі з використанням зовнішніх п'єзоелектричних приводів. Головним недоліком п'єзоелектричних матеріалів, що стримує їх використання безпосередньо у полі НВЧ - це великі діелектричні втрати у області надвисоких частот. Останнім часом знайдено ряд п'єзоелектричних матеріалів із досить низьким НВЧ поглинанням. Це сіленіти, евлітіни, лангасіти. Спільне використання п'єзоелектричних властивостей, низьких діелектричних втрат та високої проникності таких матеріалів безпосередньо у полі НВЧ представляється

дуже цікавими для створення на їхній основі НВЧ коливальних систем з електронним регулюванням резонансної частоти.

Напрямки електронного, магнітного та механічного керування параметрами добре відомі і мають великий попит у НВЧ технологіях. Подальший розвиток цих напрямків базується на розробці нових та вдосконаленні відомих керованих елементів, підвищення добротності та частотного діапазону напівпровідникових, сегнетоелектричних та феромагнітних керованих елементів. При всіх успіхах у цій галузі не скасовано пошук нових, перспективних шляхів керування параметрами НВЧ сигналу.

Досить інтенсивно розвивається напрямок перебудови частоти ДР через посередництво зовнішніх п'єзоелектричних елементів. При такому засобі перебудови частоти переміщення, збурюючих електромагнітне поле ДР нерезонансних елементів або складових частин ДР здійснюється за рахунок деформації п'єзоелемента, під впливом керуючого низькочастотного поля. Перевага такого засобу полягає у збереженні високої добротності ДР при перебудові частоти у смузі не менше 10%. Інші позитивні якості такого п'єзоелектричного методу це: електрична розв'язка між входом і виходом; висока радіаційна стійкість; працездатність у широкому інтервалі кліматичних умов; стійкість до агресивних середовищ; простота вузла керування; сумісність як з аналоговими, так і цифровими електронними схемами; низька потужність споживання (10-6...10-3 Вт). Найбільш ефективний такий п'єзоелектричний метод перебудови частоти на частотах вище 20 ГГц.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний з розробкою конструкцій діелектричних резонансних елементів, у яких резонансна частота має велику чутливість до зміни геометричних розмірів або розтушування складових частин, що з одного боку дозволить зменшити діапазон керуючих напруг, а з другого боку дозволить підвищити швидкодію перебудови резонансної частоти.

Перспектива успішного використання такого методу пов'язана з удосконаленням технології п'єзоелектричних матеріалів та конструкцій п'єзоперетворювачів.

Таким чином, головна перевага електромеханічного управління резонансною частотою, це те що добротність системи не знижується.

У вирішенні проблеми керування частотою і фазою НВЧ сигналу на даний час, головне місце посідають досконалі технології, новітні активні діелектричні матеріали, так і пасивні діелектричні матеріали для, власне як середовища передачі НВЧ коливань.

1.2. Особливості використання п'єзоефекту для управління характеристиками НВЧ пристроїв

Велика кількість існуючих на сьогоднішній день принципів перебудови резонансної частоти та інших параметрів коливальних систем НВЧ пристроїв указує на важливість та невирішеність проблеми. Серед механічних, електричних і комбінованих методів перебудови частоти можна нарахувати близько двадцяти основних принципів, не враховуючи різні варіанти реалізації принципів перебудови частоти [5]. Всі вони мають свої переваги і недоліки. У роботі, наприклад, наведена порівняльна таблиця для фазообертачів з точки зору принципів побудови:

Таблиця 1.2 – Порівняльні характеристики різних типів фазообертачів.

PERFORMANCE OF OEPLL-PS AND CONVENTIONAL PHASE SHIFTERS							
Type	f_o (GHz)	$\Delta\theta_{\text{shift}}$	$\Delta\theta_{\text{error (rms)}}$	$\Delta\theta_{\text{rms}}$	$\eta_{\text{loss (dB)}}$	Broadband	Ref.
Waveguide (true time delay)	40	$<20^\circ$	$\pm 2^\circ$	-	1.3	no (12%)	2
Ferrite	2 to 40		$\pm 5\%$	-		no	3
Digital FET	18-40	$180^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ 3 Bit	$\pm 10^\circ$	-	9.5 ± 2.5	no	4
Electronic PLL	1.5	468°	$\pm 2.6^\circ$	0.8°		yes	15
Analog varactor	6-18	$360 \pm 17^\circ$		-	2.7 ± 1.3	no	9
Fiber Optic (true time delay)	2-18	100°	5°	-		no	6
Optoelectronic	60	360°		0.1°	~ 40	no	8

У роботі наведена порівняльна таблиця фазообертачів з точки зору особисто керуючого елемента, вартості та технологічності і зроблено висновок, що за електричними характеристиками електромеханічний керуючий елемент найкращий, але замало швидкодіє (Табл 1.3).

Уже традиційним стало використання п'єзоелектриків для юстирування приводів де необхідні відносно великі переміщення (до 10^{-3} м) і висока точність позиціонування (до $5 \cdot 10^{-9}$ м). Тобто з цього боку надійність і ефективність використання п'єзоелектриків для малих переміщень підтверджена практично.

Таблиця 1.3 – Порівняльні характеристики фазообертачів з точки зору використаного керуючого елементу.

Параметр	Діод p-i-n	МЕ МС	Сегнето- електрична ємність	Варакторний діод	Польовий транзистор
Перебудова CO/CU	-	100	1.5-2	2-4	-
Якість перебудовиCQF	середня	висока	середня	середня	низька
Час переключення, с	106	105	1010	106	109
Споживання енергії	висока	низька	низька	низька	низька
Вартість	середня	висока	низька	середня	середня
Ретабельніст ь виробництва	висока	низька	висока	висока	висока

Але використання зовнішнього п'єзопривода для керування резонансною частотою, наприклад, ДР шляхом збурення його поля означає істотне збільшення габаритів і мало прийнятні у мобільній НВЧ апаратурі.

На наш погляд існує реальна можливість використання п'єзо- або електрострикційного ефекту без збільшення габаритів діелектричного резонансного пристрою, тобто якщо п'єзо привід працює безпосередньо у полі НВЧ, будь, то діелектричний резонатор, виготовлений з п'єзоелектричного матеріалу, п'єзоелектричний привід безпосередньо підключений до високо добротного діелектричного резонансного планарного чи хвилеводного елемента, сконструйованого так, що цей п'єзоелектричний привід не вносить додаткових втрат.

Розглянемо такі можливості. Резонансна частота діелектричного резонансного елемента, будь то відкритий діелектричний резонатор (ДР), коаксіальний діелектричний резонатор (КДР) або мікροстрічковий діелектричний резонатор (планарний) визначається діелектричною проникністю і геометричними розмірами. Невід'ємна частина діелектричного резонатора це його зовнішнє поле, збурення якого призводить до

зміщення резонансної частоти. Таким чином ми маємо, що найменш, три напрямки для вирішення задачі перебудови частоти.

Керування діелектричною проникністю безпосередньо електричним полем не можливе, бо діелектрична проникність для високочастотних діелектричних матеріалів не залежить від поля. Один із шляхів вирішення цієї проблеми:

- це складні ДР, які відрізняються наявністю діелектричних включень у вигляді повітряних щілин між частинами резонатора котрі, збудовуючи електромагнітне поле діелектричного резонатора, приводять до зсуву частоти;
- змінення взаємного розташування двох частин високо добротного діелектрика у хвилеводі, що приводить до змінення постійної розповсюдження;
- використання п'єзоприводу для створення керованої повітряної ємності, що впливає на перерозподіл поля того чи іншого НВЧ резонансного елемента.

В принципі існує, поки не реалізована можливість електричного керування частотою ДР, за рахунок змінення його геометричних розмірів, використовуючи п'єзоєфект. У дійсний час уже відомо декілька п'єзоелектричних монокристалів, що за своїми діелектричними характеристиками задовольняють вимогам до матеріалів для ДР. Це монокристали типу сіленіта, євлітіна, лангасіта, монокристалічного ніобату літію. Спільне використання п'єзоелектричних властивостей, низьких діелектричних утрат та високої проникності таких матеріалів безпосередньо у полі НВЧ представляється дуже цікавими для створення на їхній основі НВЧ коливальних систем з електронним регулюванням резонансної частоти.

Перевага використання п'єзоприводу полягає у збереженні високої добротності резонансного елемента при перебудові частоти. . Інші позитивні якості такого п'єзоелектричного методу це: електрична розв'язка між входом і виходом; висока радіаційна стійкість; роботоздатність у широкому інтервалі кліматичних умов; стійкість до агресивних середовищ; простота вузла керування; сумісність як з аналоговими, так і цифровими електронними схемами; низька потужність споживання (10-6-10-3Вт). Головні недоліки означеного методу - це деяке збільшення габаритів. Перспектива успішного використання такого методу пов'язана з удосконаленням технології п'єзоелектричних матеріалів та конструкцій п'єзо перетворюючих елементів.

Виконані нами дослідження показали, що включення у резонатор регулюємої повітряної щілини між його складовими частинами, дозволяє одержати перебудову резонансної частоти у досить широких межах. На цьому принципі нами побудовано складний діелектричний резонатор із регулюванням частоти зовнішнім п'єзоелектричним

приводом [6]. Резонансна частота основного типу коливань змінюється більш ніж на 30% при регулюванні щілини від нуля до декількох десятків мікрон. Особиста добротність ДР залишається такою, як і у монолітного ДР на таку ж частоту.

На основі такого принципу можна побудувати складений діелектричний резонатор, виготовлений з п'єзоелектричного матеріалу з малим НВЧ поглинанням і регулювати резонансну частоту НВЧ діелектричного резонатора, використовуючи п'єзоелектричні властивості цього матеріалу.

Другий напрямок - це змінення геометричних розмірів особисто діелектричного резонатора і таким чином керувати резонансною частотою. Розглянемо можливість зміщення геометричних розмірів за допомогою п'єзоефекту.

$$F(D) := \frac{210}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \sqrt{\frac{L}{D}} \cdot (D^2 \cdot L)^{\frac{1}{3}}} \quad (1.1)$$

Чисельний розрахунок для реальних розмірів ДР, з нормальним співвідношенням L/D показує, що змінення діаметра ДР з матеріалу з проникністю $\varepsilon = 40$ на 0.1 мкм. зсуває резонансну частоту приблизно на 0.1 МГц, що на частоті 10 ГГц. складає тисячну долю процента.

Оцінимо змінення геометричних розмірів зразка за рахунок п'єзоефекту. Зміщення геометричних розмірів п'єзоелектричного зразка при перетворенні електричної енергії в механічну обумовлено законом зворотного п'єзоефекту, при цьому відносна деформація описується виразом:

$$S_x = \frac{\Delta X}{X} = d_{ij} E_x \Big|_{T_x=0} \quad (1.2)$$

де S_x — відносна деформація п'єзоелемента;

E_x — напруженість зовнішнього електричного поля;

d_{ij} — п'єзоелектричний модуль матеріалу;

ij — напрямок дії електричного поля і деформації.

Виходячи з (1.2) вирази для розрахунку поздовжньої і поперечної п'єзо деформацій відповідно, що пов'язують керуюче напруження U , довжину L , та товщину t п'єзоелемента з величиною деформації Δx мають вигляд:

$$\Delta x = \frac{3}{4} \left(\frac{d_{31} U L^2}{t^2} \right) \quad (1.3)$$

$$\Delta x = \frac{d_{33} U L}{t} \quad (1.4)$$

Слід підкреслити, що лінійність виразів (1.2) і відповідно (1.3 та 1.4) зберігається у слабких полях (1В/мм). Для одержання значних деформацій необхідно істотно підвищувати напруженість, що викликає нелінійні зміни п'єзо модуля у залежності від електричного поля.

Чисельний розрахунок для реальних геометричних розмірів діелектричного резонатора на частоті 10ГГц, показав, що прикладення низькочастотного або постійного керуючого поля до ДР виготовленого з п'єзоелектрика призведе до подовження діаметра ДР на долі мікрона, що викличе зміщення резонансної частоти і хоча буде зафіксовано але практичного до використання ще далеко.

З другого боку подовження п'єзо деформація більш перспективна оскільки забезпечує значні переміщення від ангстрем до сотень мікрон для сучасних п'єзокерамічних матеріалів. Монокристалічні п'єзоелектрики і зокрема сіленіти або ніобати суттєво поступаються їм по деформаційним характеристикам. Розрахунки показують, що деформація для монокристалічних п'єзоелементів біморфного або камертонного типів може сягати десятків мікрон, що достатньо для реалізації керування резонансною частотою діелектричного резонансного НВЧ елемента.

Для успішного використання діелектрика при розробці НВЧ пристроїв необхідне всебічне й детальне дослідження особливостей поведінки його діелектричних характеристик у широкому частотному та температурному діапазонах і на основі одержаних даних узгоджувати вимоги до діелектрика у плануємому використанні і його можливості.

1.2.1 П'ЄЗО- І ЕЛЕКТОРОСТРІКЦІЙНІ АКТЮАТОРИ ТА МАТЕРІАЛИ

У багатьох галузях науки і техніки існує проблема електрично керованих макро- і мікропереміщень, як то юстування оптичних приладів, прецизійних препаративодіїв, точного суміщення об'єктів у виробництві і т.п.

Найбільш розповсюджені пристрої, призначені для таких цілей це п'єзоелектричні та електрострікційні приводи (актюатори, трансдюкери). В залежності від конструкції вони забезпечують переміщення від долів мікрона до сотень мікрон. Збільшення переміщень неминуче пов'язане із зростанням довжини акюатора, тому актюатори на великі переміщення мають довжину декілька десятків сантиметрів, що вже неприйнятне для НВЧ

пристроїв. Тому розробка спеціальних актюаторів для НВЧ використання є актуальною. Відомі на сьогодні макетні розробки електромеханічно керованих, на основі примітивних п'єзоелектричних виконавчих механізмів, НВЧ фільтрів, фазообертачів та інших НВЧ пристроїв по таким показникам як габарити, швидкодія, вібростійкість, значення керуючої напруги, мало задовольняють вимогам НВЧ техніки, особливо мобільної.

Для п'єзоелектричних та електрострикційних електромеханічних систем, певне, можна виділити три головні напрямки використання: актюатори (опозиціонери), двигуни та збуджувачі (приймачі) коливань у інших середовищах.

Для практичних конструкцій актюаторів використовується в основному поперечна і повздовжня деформації, відповідно пакетні і біморфні конструкції у квазістатичному режимі Рис.1.2.

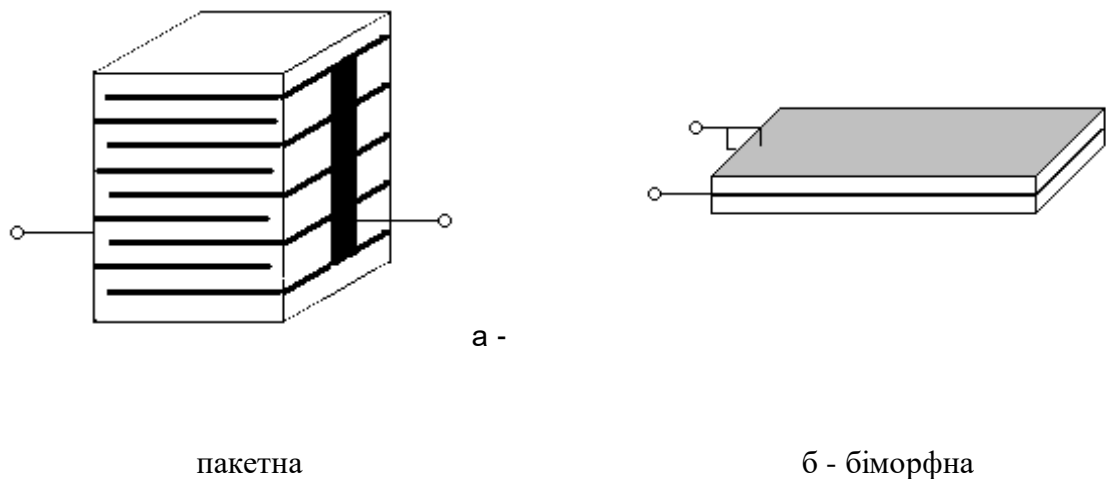


Рисунок 1.3 - Пакетна і біморфна конструкції п'єзоелектричних виконавчих механізмів.

Багатошарові актюатори у яких від десятків до сотень тонких шарів п'єзоелектричної або електрострикційної кераміки з електродами, склеєних між собою мають перевагу у відносно низькому керуючому напруженні (приблизно 100 В.), досить високій швидкодії (мікросекунди), значному генеруємому зусиллі (100 Н і вище) при високому електромеханічному зв'язку. Але малий діапазон переміщень обмежує область їх використання. Швидкодія визначається часом перезаряду п'єзоелемента на вихідному опорі джерела напруги і складає мікросекунди.

У протилежність багатошаровій, біморфна конструкція складеться з двох шарів, забезпечує значне переміщення (до сотень мкм) але низька швидкодія, (близько 1 мілісекунди), мале генеруєме зусилля і надто мала вібростійкість, обмежує застосування таких актюаторів в НВЧ пристроях. Таким чином, перші забезпечують велике зусилля,

але для прийнятних розмірів, малу деформацію. Другі забезпечують велику деформацію, але мале зусилля. Це привело до розробки декількох нових типів актюаторів, з використанням принципу важеля. Результати перших розробки у цьому напрямку наведені у роботі [7], рис.1.4(а,б). У роботі [8] пропонована важільна складна конструкція рис.1.4 (г), та актюатор з сферичною поверхню рис.1.4(д) [9]. Актюатори типу “Moonie” та “Cymbal” рис.1.4(е, ж), винайдені авторами [10,11] відповідно вельми привабливі для розробки на цьому принципі актюаторів для НВЧ застосувань.

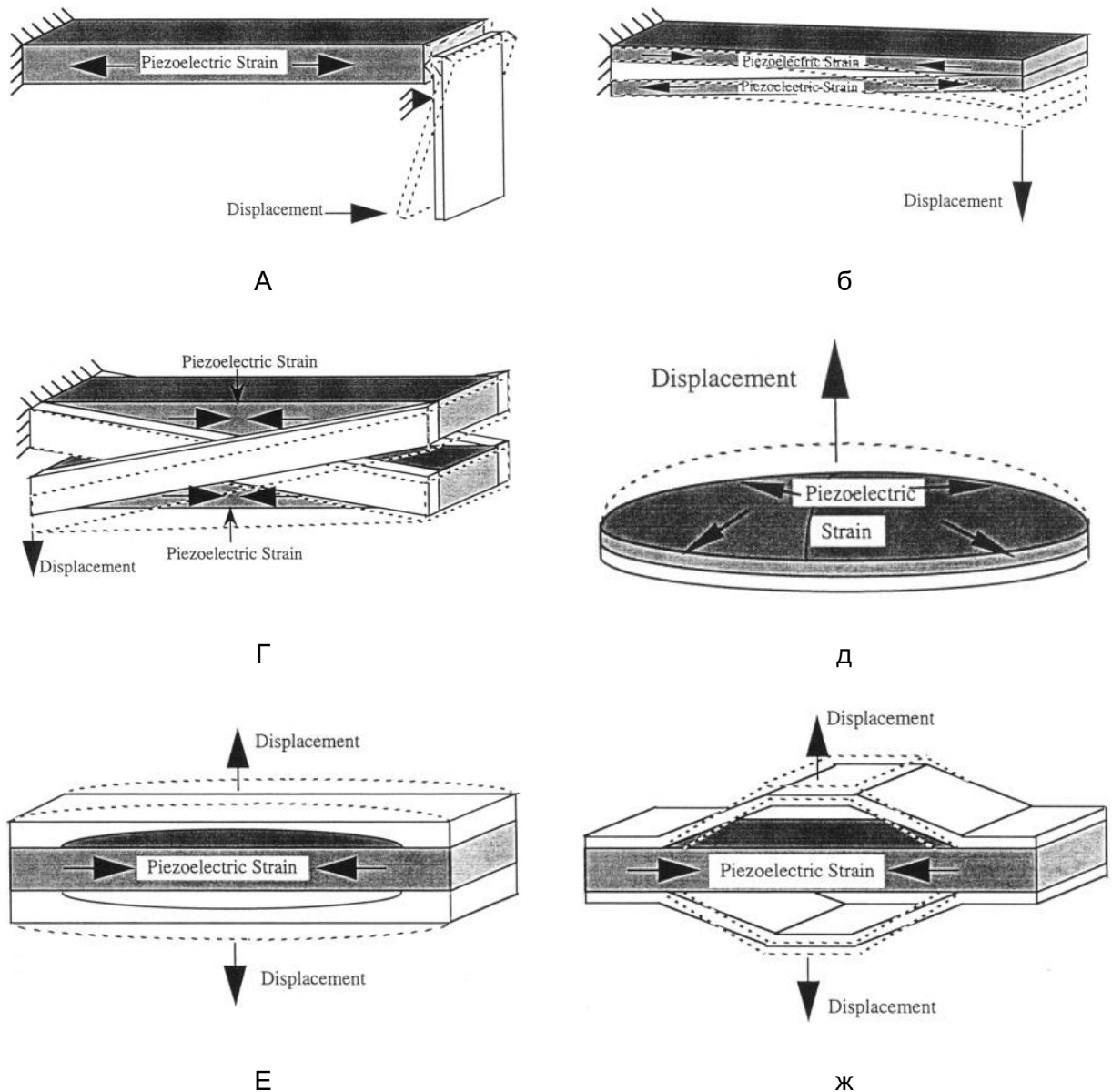


Рисунок 1.4 - П'єзоелектричні актюатори.

Цікавий актюатор розроблений у роботі [11] рис 1.4, що нагадує рис 1.4(д), але значно перевищує по деформаційним характеристикам. Актюатор складається з

підкладенки (нержавіюча сталь), двох шарів скла, між ними п'єзоелемент і верхній електрод-алюміній.

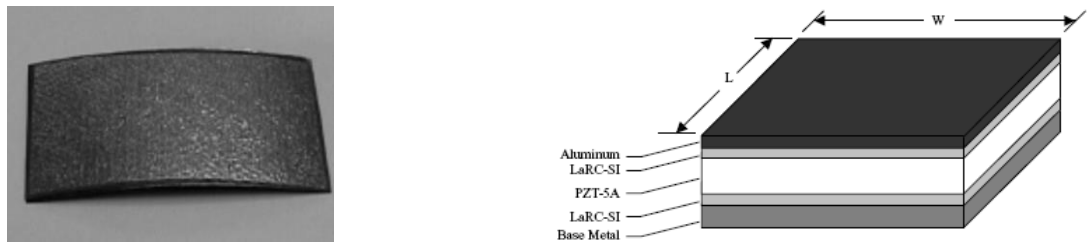


Рисунок 1.5- П'єзоелектричний комбінований актюатор.

Цей пакет нагрівається до температури плавлення скла і поступово охолоджується. В результаті пакет деформується рис.1.5(лівий). При прикладенні постійної напруги 250 вольт, на товщину п'єзопластини 150 мкм, одержано деформацію 150 мкм, при достатній жорсткості.

Надзвичайно цікавий, з точки зору НВЧ використання, є композиційний металокерамічний електромеханічний перетворювач, так званий «Мооніє» рис.1.5(е) [9]. Мабуть його можна назвати підсилювачем переміщень. Цей актюатор за своїми характеристиками зайняв місце між багатошаровими і біморфними актюаторами. При приблизно однакових об'ємах він забезпечує переміщення в шість – десять разів більше ніж багатошаровий і розвиває зусилля до кілограмів, що значно більші ніж біморфний. Останнє вказує на те, що приєднана маса практично не впливає на його робочі характеристики. При цьому, швидкодія «Мооніє» актюатора залишається практично на рівні багатошарового. Кількість шарів активного діелектрика в такому актюаторі значно менше ніж в багатошаровому, тобто, загальна висота актюатора мала. Кількість шарів і товщина кожного шару із компромісних міркувань визначається мінімальною керуючою напругою і жорсткістю необхідною для того чи іншого використання, з одного боку і мінімальною ємністю активного елемента актюатора – з другого боку. Таким чином актюатори типу, «Мооніє» уявляються дуже перспективними для побудови на їх основі керованих НВЧ пристроїв. Але проблему вважати вирішеною не можна. Виникає декілька питань, як то гістерезис, термостабільність і т.п. Наприклад для «Мооніє» у роботі [13] наведена температурна залежність деформації Рис1.6.

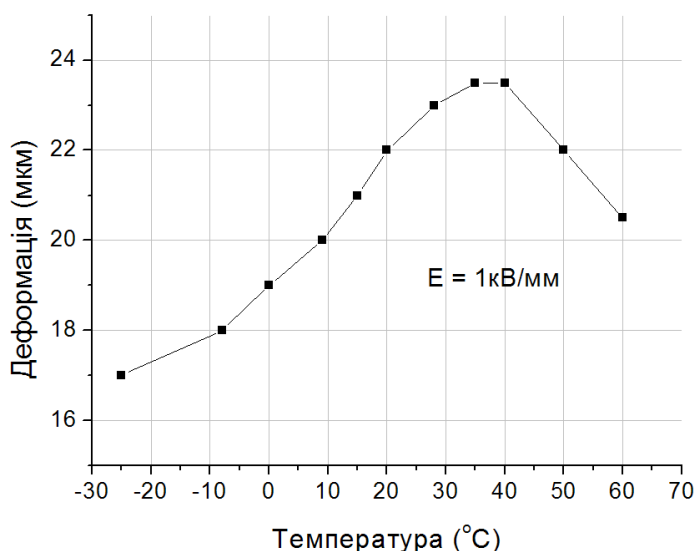


Рисунок 1.6 - Температурна залежність деформації для п'єзоелектричного актюатора типу «Moonie» [10]

При необхідних переміщеннях біля 50мкм, така залежність від температури велика.

Для електромеханічно керованих пристроїв НВЧ задовільними характеристиками володіють пакетні та металокерамічні актюатори.

Розроблені нами декілька конструкцій електромеханічно керованих фільтрів та фазообертачів, дозволили з'ясувати деякі особливості актюаторів для НВЧ застосувань, на відміну від відомих та промислово виготовляємих.

Окрім основних вимог, як то – висока точність позиціонування, вібростійкість, термостабільність та інших загальних вимог, актюатори для НВЧ використання мають слідуєчі особливості.

Форма і конструкція актюаторів повинна легко вписуватись у конкретну конструкцію НВЧ пристрою і не вносити додаткових неоднорідностей. Особливо це стосується планарних конструкцій, коли актюатор працює безпосередньо у полі НВЧ.

Вимоги до зусилля малі. Приєднана маса збурюючого елемента не перевищує декількох грамів.

Актюатор повинен забезпечити потрібне переміщення при мінімальній керуючій напрузі (≤ 50 вольт). Необхідне переміщення ≤ 150 мкм. У ряді випадків, досить 50 мкм.

Один з важливих параметрів – вартість актюатора повинна бути сорозмірна з вартістю НВЧ пристрою.

Термостабільність актюаторів визначається не тільки властивостями активного діелектрика, але ще й властивостями додаткових матеріалів, типу ізоляційних покриттів,

електродів, скліючих речовин. У промислових актюаторах досягнуто термостабільності $\leq 3 \text{ ppm/K}$.

Гістерезис, властивий п'єзоелектричним матеріалам, дуже не бажаний для НВЧ пристроїв. Деякі п'єзоелектричні матеріали мають досить вузьку петлю гістерезису, це жорсткі п'єзоелектрики, наприклад PZT-8. Вище згадані позитивні якості одержані для «Moonie» виготовлених з п'єзокераміки типу PZT $[\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3]$ або PZTL $[\text{Pb},\text{La}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3]$. Для цих матеріалів у слабких полях (1В/мм) деформація пропорційна напруженості поля ($x=dE$). Але, коли напруженість стає високою (100В/мм. і вище), тобто звичайні робочі поля, лінійність порушується, з'являється значний гістерезис внаслідок реорієнтаційної поляризації. Це в значній мірі обмежує використання цих матеріалів в актюаторах, оскільки гістерезис неприпустимий для більшості використань. Вирішити цю проблему можна двома шляхами. По перше, використовувати відомі матеріали потрібної системи $[\text{Ba}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3]$ або $[\text{Ba}(\text{Ti},\text{Zr},\text{Sn})\text{O}_3]$, в яких дуже вузька петля гістерезису і надзвичайно мале коерцитивне поле. Але п'єзо модулі цих матеріалів значно менші ніж в ЦТС і відповідно менша деформація. Тим не менш актюатори з цих матеріалів показують задовільні характеристики. Проводиться пошук нових більш ефективних матеріалів.

Інший підхід до вирішення проблеми гістерезису це використання електро-стрикційних матеріалів, наприклад PMN $[\text{Pb}(\text{Mg},\text{Nb})\text{O}_3]$. Магніюніобати свинцю - електрострикційні монокристали з унікальними деформаційними характеристиками. Таким чином є надія, що головна проблема п'єзоелектричних актюаторів - проблема гістерезису буде вирішена.

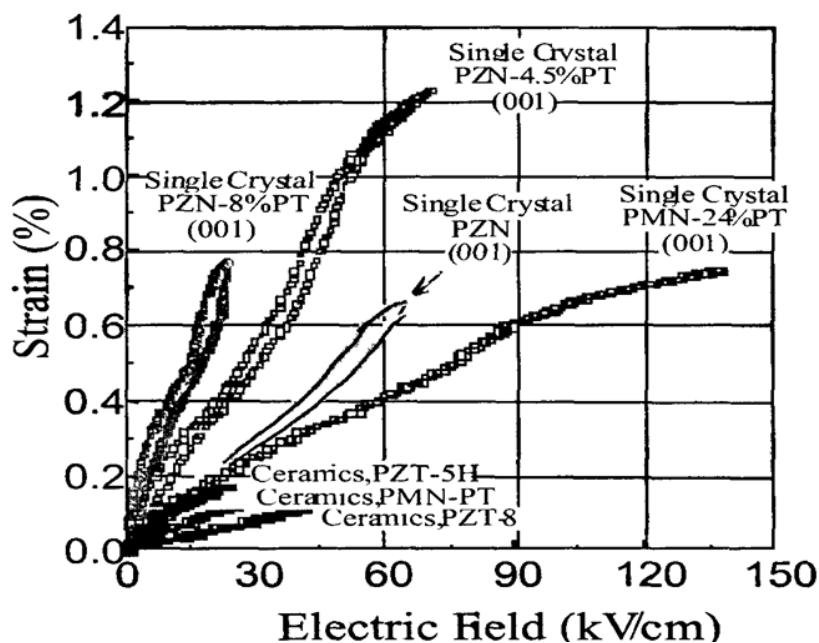


Рисунок 1.7 - Порівняння деформації в залежності від напруженості електричного поля для кристалів PMN-PT і п'єзокераміки типу PZT [12].

Деформація сягає (0.5-1.5)% при напруженості електричного поля 35-100 кВ/см. Деформаційні характеристики магніюбату свинцю у п'ять разів перевищують такі характеристики звичайних п'єзоелектричних матеріалів.

Для цього матеріалу гістерезис зневажливо малий, хоча при малих напруженостях поля початкова ділянка залежності деформації від поля помітно нелінійна, це легко ліквідується попереднім навантаженням.

Таким чином є надія, що проблема п'єзоелектричних актюаторів - проблема гістерезису буде вирішена.

З погляду розробки спеціальних актюаторів, нами досліджені РЧ діелектричні характеристики електросрикційного матеріалу PMN-38%PT та деформаційні характеристики актюаторів з цього матеріалу, як нами розроблених, так і промислових.

Залежність діелектричної проникності і втрат від прикладеного постійного поля, для електрострикційного матеріалу PMN-PT ($[\text{Pb}(\text{Mg,Nb})\text{O}_3 + \text{PbTiO}_3]$, (виготовлювач T R S Ceramics, Inc, USA) Рис.1.7-1.8, для зразків завтовшки 0.5 мм отримана за допомогою вимірювача добротності BM-560. Похибка вимірювань проникності не перевищує 2%, а $\text{tg} \delta$ – 7%.

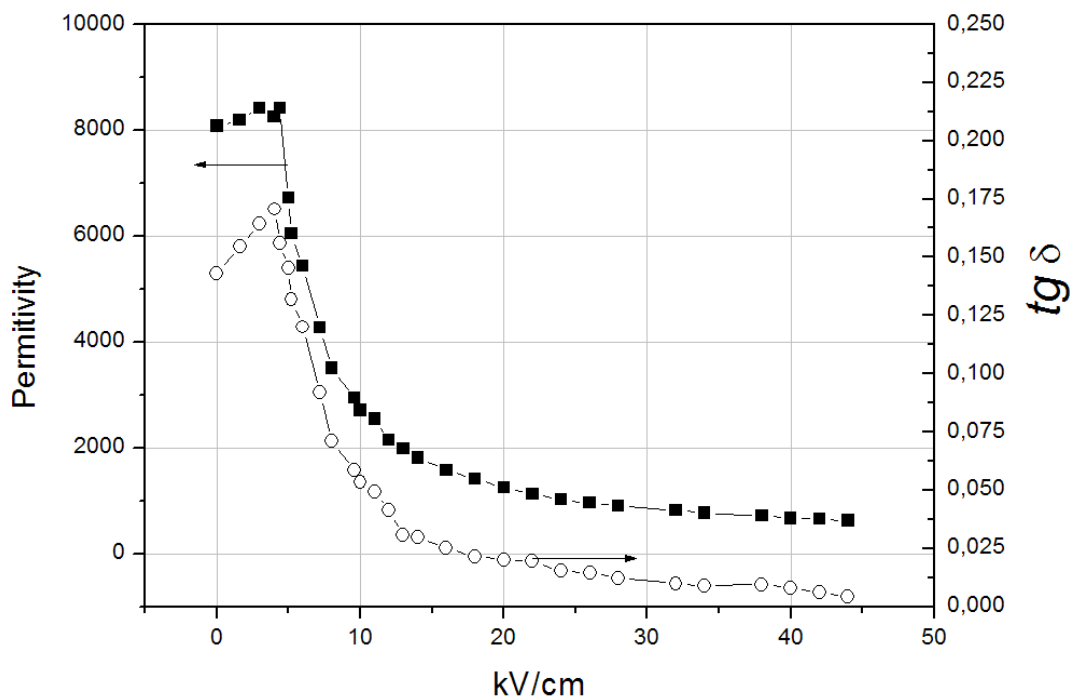
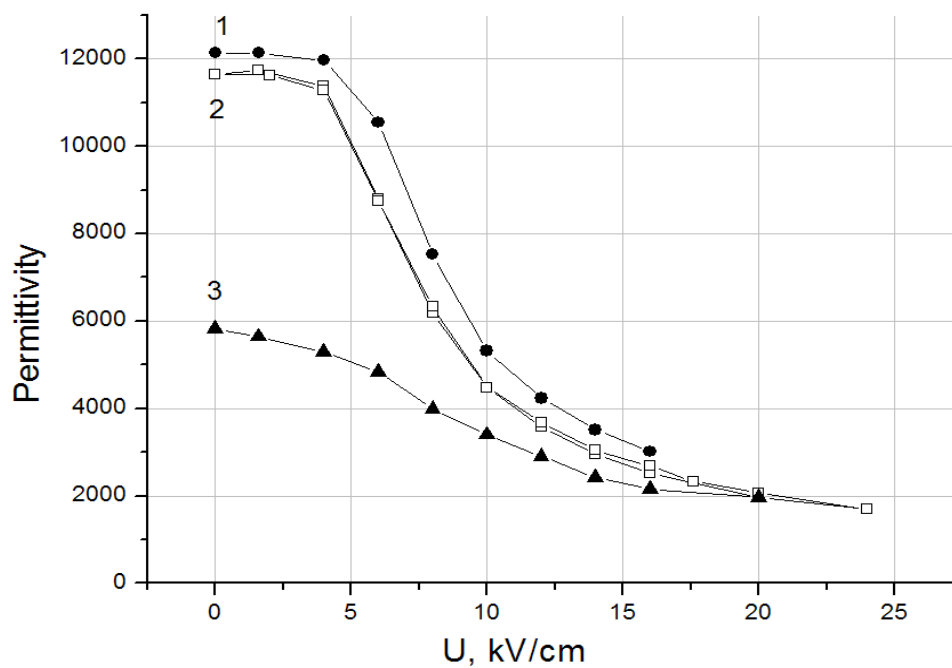
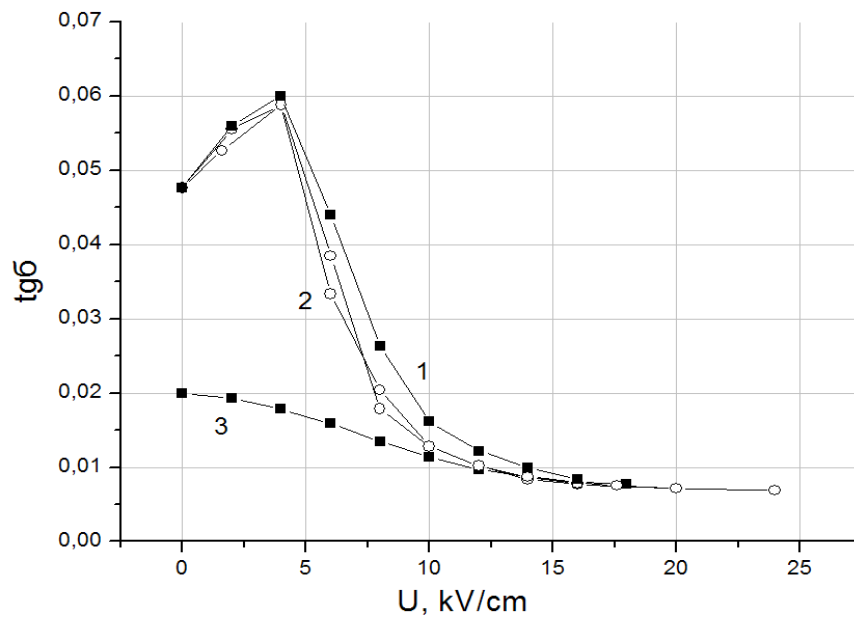


Рисунок 1.7 - Залежність діелектричної проникності і втрат від напруженості постійного поля, для електрострикційного матеріалу PMN-4.5PT
 $[\text{Pb}(\text{Mg},\text{Nb})\text{O}_3+4.5\%\text{PbTiO}_3]$.



1 – Ag, 10мкм, 2 – Au, 2 мкм, 3 – Ag, 80мкм

Рисунок 1.8 - Залежність діелектричної проникності від напруженості постійного поля, для електрострикційного матеріалу PMN-38 з різними електродами.



1 – Ag, 10мкм, 2 – Au, 2 мкм, 3 – Ag, 80мкм

Рисунок 1.9 - Залежність діелектричних втрат від напруженості постійного поля, для електрострикційного матеріалу PMN-38 з різними електродами.

З наведених характеристик можна зробити такі висновки:

- фазовий перехід знаходиться поблизу кімнатної температури, на що вказує характерна поведінка ϵ і $\text{tg}\delta$ при підвищенні напруженості поля;
- тонкі електроди не впливають на діелектричні характеристики, але товсті електроди рівнозначні прикладенню тиску до зразка, що треба мати на увазі при розробці актюаторів;
- товсті електроди це шлях до розробки нового типу актюаторів.

На основі таких матеріалів нами розроблено декілька спеціальних металокерамічних актюаторів в основному на принципі важеля оскільки деформацій особисто активного елемента недостатньо, а вимоги до зусилля малі. Такий принцип застосований в актюаторах типу «Moonie», «Cymbal». Першим був виготовлений актюатор на суцільній електрострикційній пластині PMN-38 з золотими електродами, рис.1.10.



Рисунок 1.10 - Актюатор на суцільній електрострикційній пластині PMN-38.

В хвильоводних трактах часто застосовують механічні вимикачі і перемикачі. У найпростішому вимикачі (рис. 1.11, а) з'єднання між хвильоводами проводиться за допомогою хвильоводного каналу в поворотному металевому роторі. Для надійного електричного контакту на бічній поверхні ротора виконують дросельні канавки (типу звичайного дросельного фланця). При повороті ротора на 90° хвильоводи закорочуються поверхнею ротора, а дросельні канавки перешкоджають просочуванню сигналу по зазору між ротором і корпусом. У більш складному перемикачі (рис. 1.11) ротор містить три хвильоводних каналу, що допускають чотири типи з'єднань між чотирма входами.

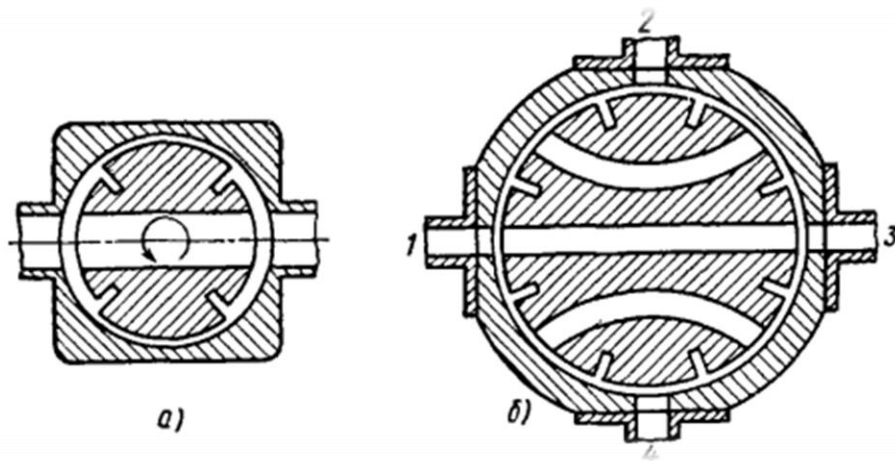


Рисунок 1.11- Механічні хвильові комутатори

У механічних фазовращателях проходного типу зміна електричної довжини відрізків лінії передачі можна здійснювати, регулюючи їх геометричну довжину або змінюючи коефіцієнт фази. Розглянемо принцип дії механічного фазовращателя, відомого під назвою «тромбон». Цей фазообертач для жорсткого коаксіального тракту показаний на рис. 1.12. Для забезпечення узгодження точки ковзають контактів у внутрішньому і зовнішньому коаксіального хвильоводу рознесені по довжині лінії, так що на всіх стикуються між собою відрізках лінії передачі зберігається однакове ставлення діаметрів зовнішнього і внутрішнього провідників, т. Е. Забезпечується постійне хвильовий опір. Додаткова компенсація відображень на стиках проводиться невеликим зсувом сходинок Δl во внутрішньому, і зовнішньому коаксіальних провідниках.

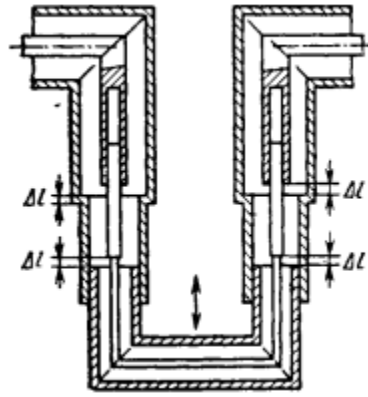


Рисунок 1.12 Коаксіальний тромбон фазообертач

Хвильоводні фазовращатели зі зміною коефіцієнта фази хвилі H_{10} прямокутного хвильоводу показані на рис. 1.13. У конструкції на рис. 1.13, а діелектричну пластину занурюють паралельно силовим лініям E в прямокутний хвильовід через невідпромінюючі щілину в середині широкої стінки, що призводить до уповільнення хвилі і збільшення запізнювання на виході фазовращателя. Скоси на краях діелектричної пластини грають роль плавних переходів, що забезпечують узгодження фазовращателя. Підбираючи форму скосів, можна змінювати вид залежності внесеного фазового зсуву від глибини занурення пластини.

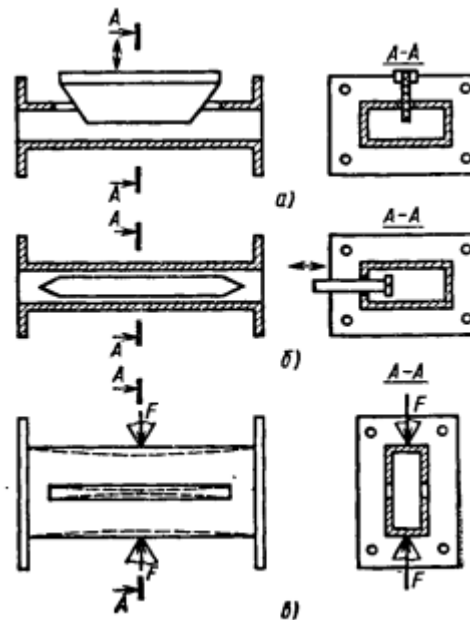


Рисунок 1.13 Хвильоводні механічні фазовращатели.

У конструкції на рис. 1.13 б діелектрична пластина переміщається від краю до центру хвильоводу держателем, пропущеним через отвір в бічній стінці хвильоводу. При просуванні пластини в область більшої концентрації поля E збільшуються уповільнення хвилі в хвильоводі і запізнювання, що вноситься фазовращателем. Краї пластини скошені

для зменшення відображень. У конструкції на рис. 1.13, в хвилевід виконаний з пружного металу і в середині широких стінок прорізані неізлучаючне поздовжні щілини. Під дією зовнішнього зусиллі F , прикладеної до вузьких стінок хвилеводу, ширина хвилеводу a змінюється, що призводить до зміни критичної довжини волни $\lambda_{кр} = 2a$ і фазової швидкості хвилі H_{10} (стиснення хвилеводу зменшує запізнювання фази).

Для створення змінних аттенюаторів зазвичай використовують явище експоненціального ослаблення хвиль в позамежних волноводах. На рис. 1.14 показані схеми коаксіальних аттенюаторів на основі відрізка круглого хвилеводу змінної довжини і малого діаметра, в якому хвилі всіх типів є не поширюються. У схемі рис. 1.14, а в позамежному круглому хвилеводі збуджується хвиля типу E_{01} за допомогою ємнісного зонда, а в схемі рис. 1.14, б - хвиля типу H_{11} за допомогою петлі зв'язку. Ослаблені коливання цих хвиль приймаються на іншому кінці круглого хвилеводу ємнісним зондом або петлею зв'язку, з'єднаними з коаксіальним волноводом. Ослаблення аттенюаторів (дБ) на позамежних волноводах прямо пропорційно довжині відрізка позамежного хвилеводу і тому може бути змінено в широких межах. Атенюатори за схемами рис. 1.14, а, б не узгоджені, ослаблення в них обумовлено відбитками від входів.

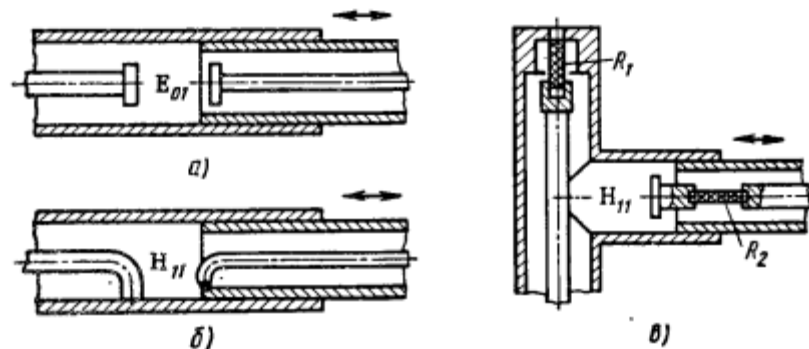


Рисунок 1.14 Коаксіальні аттенюатори на позамежних волноводах.

Для узгодження входів в схеми позамежних аттенюаторів вводять поглинають елементи. На рис. 1.14, в показаний узгоджений аттенюатор на позамежному хвилеводі з поглинаючими резисторами. Центральний провідник вхідного коаксіального хвилеводу, замкнутого на узгоджене навантаження R_1 збуджує в круглому хвилеводі бічного відгалуження загасаючу хвилю типу H_{11} , прийняту на іншому кінці хвилеводу індуктивним зондом. У ланцюг зонда включена поглинає вставка R_2 , що забезпечує узгодження на виході аттенюатора. Зміна ослаблення відбувається при зміні довжини круглого хвилеводу за допомогою змінного з'єднання в зовнішньому провіднику вихідного коаксіального хвилеводу.

В хвильоводних трактах застосовують також хвильові атенюатори з поглинаючими пластинками. По конструкції такі атенюатори аналогічні хвильовим фазовращателям, показаним на рис. 1.14, але замість діелектричних пластин в них застосовують пластини з поглинаючого матеріалу. При переміщенні пластин в область хвильоводу з більшою напруженістю електричного поля збільшується потужність, що розсіюється в пластинах, і одночасно зростає ослаблення, що вноситься атенюаторами. Форма пластин визначає якість узгодження входів і вид градуировочной кривої ослаблення атенюаторов.

1.3 Діелектричні резонатори в керованих пристроях НВЧ.

Діелектричний резонатор являє собою частину діелектричного (непровідного) матеріалу, як правило, кераміку, яка призначена для функції в якості резонатора для радіохвиль, як правило, в мікрохвильових і міліметрових хвилях смуг. Мікрохвилі обмежуються всередині резонаторного матеріалу різкою зміною прохідності на поверхні і відскакують туди-сюди між сторонами. На певних частотах, резонансних частотах мікрохвилі утворюють стоячі хвилі в резонаторі, коливаючись з великими амплітудами. Діелектричні резонатори зазвичай складаються з «шайби» з кераміки, яка має велику діелектричну константу і низький коефіцієнт дисипації. Резонансна частота визначається загальними фізичними розмірами резонатора і діелектричної проникності матеріалу.

До діелектриків, які застосовують для виготовлення ДР, висувають такі вимоги: низькі діелектричні втрати ($\text{tg}\delta < 10^{-3}$); висока діелектрична проникність ($\epsilon_d = 30 \dots 2000$); висока електрична і механічна міцність; висока стабільність електричних параметрів в широкому інтервалі температур; висока однорідність структури і відтворюваність електричних характеристик; стабільність властивостей при впливі різних зовнішніх факторів; низька собівартість; доступність сировини і матеріалів, технологічність.

Основні параметри ДР - власна добротність Q_0 , резонансна частота f_0 , температурні коефіцієнти частоти і добротності (ТКЧ і ТК Q_0), в також обсяг - визначаються властивостями матеріалу, з якого він виготовлений, т. Е. Діелектричної проникністю ϵ_d , тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, температурним коефіцієнтом діелектричної проникності ТК ϵ_d і тангенсом кута діелектричних втрат ТК $\text{tg}\delta$, а також температурним коефіцієнтом лінійного розширення α .

Величина ϵ_d матеріалу визначає обсяг V резонатора і можливості його мікромініатюризації. Мініатюризація заснована на тому, що довжина електромагнітної хвилі в діелектрику, а значить, і розміри резонатора зменшуються в $\sqrt{\epsilon_d}$ (д) раз, при цьому обсяг V резонатора зменшується відповідно в $(\sqrt{\epsilon_d})^3$ в 3рази. При підвищенні ϵ_d знижуються додаткові втрати на випромінювання в навколишній простір. Однак при

занадто великий діелектричної проникності виникають технологічні труднощі, пов'язані з підвищеними вимогами до допусків лінійних розмірів і чистоті обробки поверхні. Оптимальна величина діелектричної проникності залежить від робочої частоти, типу порушуваних хвиль (зазвичай настройка мініатюрного ДР на робочу частоту проводиться на нижчому типі колювання) і від вимог до оптимальних геометричних розмірів ДР. З урахуванням зниження втрат на випромінювання і технології виготовлення бажано має наступні значення ϵ_d матеріалів:

Діапазон частоти, ГГц	1-2	2-4	4-8	8-18	18-40	40-12
ϵ_d	100-2000	500-1000	250-500	100-250	50-100	30-50

Найважливішим вимогою до діелектрика є вимога Інеко діелектричних втрат, що визначають величину власної добротності Q_0 . З урахуванням $\text{tg } \delta$ сучасних діелектричних матеріалів в 3-сантиметровому діапазоні на нижчому типі колювання $Q_0 = 2000 \dots 20\,000$, що перевищує добротність порожніх резонаторів. Для порівняння зазначимо, що добротність резонаторів типу «шепоче галереї» з сапфіра, охолоджених до температур рідкого гелію, на вищих типах колювань $Q_0 = 10^6$.

Загасання електромагнітних колювань в ДР в значній мірі обумовлено релаксацією механічних і термопружних напруг, а також структурних дефектів в резонансній зразку.

Тому механічні напруги, що виникають поблизу структурних дефектів кристала (великих відколів, сторонніх металевих і газових включень), призводять до зниження добротності резонаторів. Наприклад, внаслідок термічної обробки (отжиг в повітряному середовищі при температурі 1300°C і подальший відпал у вакуумі при тиску $5 \cdot 10^{-3}$ Па і температурі $1600 \dots 1700^\circ\text{C}$) для зниження термопружних і механічної напруги, що виникають в процесі вирощування кристалів лейкосапфіра, вдалося підвищити Q , кільцевих резонаторів в 1,3-1,8 рази.

Розвиток теорії та досвід застосування ДР в різних НВЧ-пристроях дозволяють класифікувати ДР з урахуванням фізичних явищ в них і основних застосувань ДР.

Діелектричний резонанс виникає при взаємодії електромагнітної хвилі з обмеженим діелектричним тілом і пов'язаний з крайовими умовами на кордоні діелектричного тіла з діелектричної проникністю ϵ_d і навколишнього середовища з діелектричною проникністю ϵ_s , меншою ϵ_d . В основі їх лежить процес розсіювання первинної електромагнітної хвилі, падаючої на діелектрик, і її суперпозиції з полем вторинної хвилі, що утворюється в результаті колювань вільних і зв'язаних зарядів в діелектрику під дією первинної хвилі. У

формуванні резонансних явищ в діелектричному тілі можуть брати участь і металеві відображають (екранують) поверхні для забезпечення спрямованого поширення енергії, переизлучение ДР. Частотний спектр розсіювання електромагнітних хвиль діелектричним тілом розбитий на три області. Високо-частотна область описується геометричною оптикою. У цій області довжина хвилі в діелектрику λ_d , менше розмірів тіла a . Низькочастотна область описується релеевської теорією розсіювання. Довжина хвилі в діелектрику в цьому випадку багато більше розмірів тіла. В області резонансного розсіювання довжина хвилі в діелектрику можна порівняти з розмірами діелектричного тіла. У цій області на певних частотах стає можливим збіг по фазі первинної та вторинної хвиль, що приводить до резонансного зростання поля розсіяної хвилі. Резонансні явища в цій області найбільш важко піддаються теоретичному опису.

Резонансні явища можливі і в високочастотній області. Однак проміжна область виділена внаслідок того, що при її теоретичному описі не можна скористатися простими приближеннями геометричній оптики або релеевського розсіювання. Крім того, в високочастотній області можливі резонанси двох типів - об'ємний, за рахунок відображень хвилі всередині діелектричного тіла від кордонів, і поверхневий в результаті накладення поверхневих хвиль, що утворюються на кордоні діелектричного тіла і поширюються уздовж цієї межі так само, як в діелектричному хвилеводі. Як об'ємний, так і поверхневий резонанси можуть бути в режимі стоячих або біжать волн. В області резонансного розсіювання існують лише об'ємні резонанси і для неї характерні наступні співвідношення між довжиною падаючої хвилі і великим розміром тіла a :

$$2\pi a \frac{\sqrt{\epsilon_c}}{\lambda} < 1 \text{ и } \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right) \left(\frac{\sqrt{\epsilon_d}}{\sqrt{\epsilon_c}}\right) > 1 \quad (1.5)$$

Резонанс наступає, коли кут падіння α електромагнітної хвилі всередині діелектричного тіла на кордон розділу відповідає розі повного внутрішнього відображення. При цьому повного відображення не відбувається, так як крутизна поверхні розділу в напрямку розповсюдження поверхневої хвилі призводить до утворення випромінених хвиль, інтенсивність яких зменшується з зменшенням ϵ_c / ϵ_d . При резонансному розсіюванні енергія, яку випромінює в навколишній простір, менше, ніж енергія, що запасється в тілі резонатора за період коливаний. Ето призводить до зростання збереженої енергії всередині тіла і в його безпосередній близькості, а також до збільшення інтенсивності розсіяної хвилі на резонансній частоті. З плином часів резонансне поле всередині і в безпосередній близькості тіла стає більшим у порівнянні з первинним і випроміненим полями.

ДР можна розділити за типами коливань з об'ємним резонансом в діелектричному тілі і з резонансом поверхневих волей, іноді званих хвилями «шепоче галереї». При цьому слід враховувати, в якому режимі, стоячих або біжучих хвиль, вони знаходяться.

Енергія об'ємних коливань більше концентрується в обсязі діелектричного тіла, а поверхневих - поблизу поверхні (в основному є внутрішньої її сторони). Ці коливання відрізняються співвідношеннями між кількістю варіацій (екстремумів) поля в радикальному і азимутному напрямках щодо центру діелектричного тіла.

Діелектричні резонатори функціонують аналогічно порожнистим резонаторам, порожнистим металевим ящикам, які також широко використовуються як резонатори на мікрохвильових частотах, за винятком того, що радіохвилі відбиваються великою зміною пропускну здатності, а не провідності металу. На частотах міліметрових хвиль металеві поверхні стають відбивачами втрат, тому на цих частотах використовуються діелектричні резонатори. Основне використання діелектричних резонаторів - це електронні генератори міліметрових хвиль (діелектричний резонатор, DRO) для управління частотою генерованих радіохвиль. Вони також використовуються в якості смугових фільтрів, а також антени. Проблема мініатюризації приладів НВЧ у дійсний час ефективно вирішується використанням у якості коливальних систем діелектричних резонаторів. Регулювання резонансної частоти у процесі виготовлення або експлуатації НВЧ приладів, яке зараз здійснюється механічними або електромеханічними засобами, в тому числі з використанням зовнішніх п'єзоелектричних приводів.

Унікальні властивості ДР (малі габарити і маса, висока добротність, стійкість до різних дестабілізуючих впливів, надійність і довговічність) стимулюють їх застосування у НВЧ-пристроях.

Головні типи коливань (або моди коливань) діелектричного резонатора, що використовуються на практиці це ТЕ, ТМ, НЕ і ЕН. Невід'ємна частина діелектричного резонансного елемента це його зовнішнє поле, збурення якого призводить до зміщення резонансної частоти.

Тому крім високої ϵ_d і малого $\tan \delta$ НВЧ-діелектрики повинні мати високу термостабільність ТК ϵ_d ($\text{ТК } \epsilon_d = 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ ТК $\tan \delta = 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ град}^{-1}$). Отримати матеріал з високою діелектричною проникністю і термо-стабільністю особливо в НВЧ-діапазоні, де можна використовувати тільки швидкі процеси поляризації (пружну поляризацію), важко, так як звичайні методи зміни електрофізичних властивостей (введення домішок, регулювання концентрацією дефектів) призводять до діелектричних втрат.

Високу здатність до поляризації без істотного поглинання електромагнітної енергії на частотах 1 ... 100 ГГц можна отримати тільки при електронній (оптичній) та іонній (інфрачервоній) поляризаціях. Інші процеси поляризації призводять до високих втрат. Як відомо, електронна поляризація характеризується невеликим за величиною і негативним температурним коефіцієнтом ($\text{TK } \epsilon_d \approx 10^{-5} \text{ град}^{-1}$), що обумовлено температурною зміною щільності діелектрика. Однак внесок цього процесу поляризації в більшості кристалів невеликий і рідко перевищує $\epsilon_\infty \leq 6$.

Отже, для отримання високодобротного НВЧ-діелектрика з $\epsilon_{\text{НВЧ}} = \epsilon_\infty + \epsilon_{\text{и.к.}} - 20 \dots 300$ слід підбирати діелектрики з високим $\epsilon_{\text{и.к.}}$.

Високі конструктивно-технологічні характеристики, високу надійність роботи при і після впливу різних зовнішніх кліматичних і механічних чинників можна отримати в кристалічних (керамічних) матеріалах, які значно дешевше і більш технологічні, ніж монокристали. Крім того, резонатори з керамічних діелектриків можна виготовляти пресуванням без додаткової механічної обробки. Це також знижує вартість керамічних ДР.

В останні роки розроблені нові більш досконалі методи виготовлення керамічних діелектриків і способи управління властивостями (механічними, електрофізичними і ін.) Керамічних матеріалів. Наприклад, методом спільного осадження компонентів можна отримувати діелектрики з добре відтворюваними властивостями, а методом гарячого пресування - з дуже низькою пористістю і оптично прозорі, однорідні кераміки. Слід зазначити, що для виготовлення ДР також застосовують складові діелектрики.

Висока діелектрична проникність на НВЧ, пов'язана з швидкими процесами поляризації, є наслідком фундаментальних властивостей кристалічної решітки. Значна сприйнятливості кристалічної решітки до зовнішнього електричного поля проявляється аномально великою величиною діелектричної проникності діелектрика і нелінійною залежністю електричної індукції від напруженості електричного поля (нелінійністю поляризації). Такі діелектрики (параелектриків) мають сильну температурну нестабільність. Для поліпшення температурної стабільності діелектрики змішують з різними добавками. Параелектриків як представники іонних кристалів мають інфрачервоний процес поляризації, який обумовлений індукованим електричним полем зміщення іонних подрешеток, і, як наслідок, мають високі $\epsilon_{\text{и.}}$ ($10^3 \dots 10^4$) при низьких діелектричних втратах. Ці речовини не завжди мають характеристики, що задовольняють всім вимогам. Однак розроблені та апробовані теоретичні моделі і гіпотези, результати численних досліджень параелектриків, анти- і сегнетоелектриків дозволили провести

аналіз властивостей матеріалів і сформулювати вимоги до цілеспрямованого пошуку та синтезу нових діелектричних матеріалів для ДР НВЧ і КВЧ діапазонів.

Діелектрична проникність визначає резонансну частоту і розміри діелектричного резонатора. На практиці для швидкого визначення резонансної частоти або необхідних розмірів діелектричного резонатора зручно користуватись розробленими нами емпіричними формулами:

$$F = \frac{A}{\sqrt{\varepsilon} \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{L}{D}} (D^2 L)^{\frac{1}{2}}} \quad (1.6)$$

де D - діаметр резонатора;

L - товщина резонатора;

F - резонансна частота;

k - L/D ;

ε - діелектрична проникність.

$$D = \frac{A}{F \left(\frac{\pi}{4}\right) \sqrt{k} \sqrt{\varepsilon} \cdot k^{\frac{1}{3}}} \quad (1.7)$$

Розрахунки по цій формулі забезпечують помилку не більше 1% для діелектричної проникності $\varepsilon = 20 - 80$ у прямокутному хвилеводі, перерізом 23×10 мм., і 2% і інших перерізах у діапазоні від дециметрів до міліметрів довжини хвиль. Для планарних структур, резонансна частота трохи зсувається у верх і залежить від проникності підкладенки та її товщини і зв'язку з ЛП але для експериментальної роботи досить точно визначається резонатор ($\leq 3\%$).

З умови $Q \times F = \text{const}$, можна орієнтовно визначити добротність діелектричного резонатора на будь якій частоті, якщо вона відома на одній частоті.

Температурний коефіцієнт резонансної частоти (ТКч) визначається трьома незалежними факторами. Це температурний коефіцієнт діелектричної проникності, коефіцієнт термічного розширення діелектрика і термічне розширення об'єма, у якому розташовано діелектричний резонатор. Без урахування впливу екрану вираз для ТКч має вигляд: $\text{ТКч} = - (1/2\text{ТК}\varepsilon + \text{ТК}l)$. З урахуванням впливу екрану у дужках додається $\text{ТК}l$ екрана з коефіцієнтом, що залежить від орієнтації ДР відносно складових поля НВЧ, коефіцієнта зв'язку і розташуванням ДР відносно поверхонь екрану. Експериментально встановлено, що впливом температурного розширення екрану можна зневажити, якщо відстань до поверхонь екрану перевищує 4 – 5 лінійних розмірів ДР.

Оскільки діелектричні резонатори знаходять все більше застосування, проблема перебудови та підбудови їх резонансної частоти стає все більш гострою.

Високодобротний діелектричний резонатор виготовляється з лінійного діелектрика і його особиста резонансна частота не може бути змінена безпосередньо електричним або магнітним полем. Тому зміна частоти можлива лише з використанням тих чи інших додаткових елементів. Таким чином перебудова або налаштування діелектричного резонатора може бути виконана декількома засобами.

- Зміненням діаметру або товщини діелектричного резонатора;
- Збуренням зовнішнього поля діелектричного резонатора металевим штирем або пластиною;
- Збуренням зовнішнього поля діелектричного резонатора діелектричною пластиною;
- Розділенням діелектричного резонатора на дві половини і зміненням відстані між ними.

Вибір того чи іншого засобу залежить від:

- Моді резонансу, що треба перебудувати;
- Кінцевої конфігурації пристрою, що включає в себе діелектричний резонатор;
- Вимогою підвищення чи зниження резонансної частоти.

Діелектричний резонатор - це шматочок діелектричного (непровідного) матеріалу, зазвичай керамічного, який призначений для функціонування резонатора для радіохвиль, як правило, у діапазонах НВЧ та міліметрів хвиль. Мікрохвилі обмежуються всередині резонаторного матеріалу різкою зміною прохідності на поверхні і відскакують туди-сюди між сторонами. На певних частотах, резонансних частотах мікрохвилі утворюють стоячі хвилі в резонаторі, коливаючись з великими амплітудами. Діелектричні резонатори зазвичай складаються з «шайби» з кераміки, яка має велику діелектричну постійну і низький коефіцієнт дисипації. Резонансна частота визначається загальними фізичними розмірами резонатора і діелектричною постійною матеріалу.

Діелектричні резонатори функціонують аналогічно порожнистим резонаторам, порожнистим металевим ящикам, які також широко використовуються як резонатори на мікрохвильових частотах, за винятком того, що радіохвилі відбиваються великою зміною проникності, а не провідності металу. На частотах міліметрових хвиль металеві поверхні стають відбивачами втрат, тому на цих частотах використовуються діелектричні резонатори. Основне використання діелектричних резонаторів - це електронні генератори міліметрових хвиль (діелектричний резонатор, DRO) для управління частотою генерованих радіохвиль. Вони також використовуються як смугові фільтри, а також антени.

Хоча діелектричні резонатори виявляють багато подібності з резонансними металевими порожнинами, є одна важлива різниця між двома: в той час як електричне та магнітне поле нульові за стінками металевої порожнини дорівнюють нулю (тобто граничні умови відкритого контуру повністю задоволені), ці поля не є нуль поза діелектричними стінками резонатора (тобто граничні умови відкритого контуру приблизно задовольняються). Незважаючи на це, електричні та магнітні поля значно розпадаються від своїх максимальних значень, коли вони знаходяться далеко від стінок резонатора. Більша частина енергії зберігається в резонаторі з заданою резонансною частотою для досить високої діелектричної постійної ϵ_r . Діелектричні резонатори можуть виявляти надзвичайно високий коефіцієнт Q , порівнянний з порожниною з металевої стіни [12].

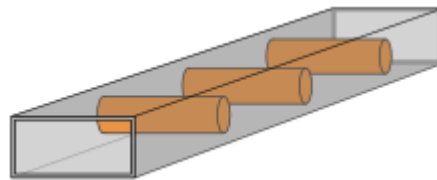


Рисунок 1.16 Діелектричні резонатори.

Хоча діелектричні резонатори виявляють багато подібності з резонансними металевими порожнинами, є одна важлива різниця між двома: в той час як електричне та магнітне поле нульові за стінками металевої порожнини дорівнюють нулю (тобто граничні умови відкритого контуру повністю задоволені), ці поля не є нуль поза діелектричними стінками резонатора (тобто граничні умови відкритого контуру приблизно задовольняються)[13].

Існує три типи резонансних режимів, які можуть збуджуватися в діелектричних резонаторах: поперечний електричний (ТЕ), поперечний магнітний (ТМ) або гібридний електромагнітний (ГЕМ) режими. Теоретично в кожній з трьох груп існує нескінченна кількість режимів, і бажаний режим зазвичай вибирається виходячи з вимог програми.

Однак оскільки діелектричний резонатор зазвичай укладений у провідниковій порожнині для більшості застосувань, реальні резонансні частоти відрізняються від обчислених вище. Коли провідні стінки огорожувальної порожнини наближаються до резонатора, зміна граничних умов і стримування поля починають впливати на резонансні частоти. Розмір і тип матеріалу, що капсулює порожнину, можуть різко вплинути на продуктивність резонансного контуру. Це явище можна пояснити, використовуючи теорію збурень порожнини. Якщо резонатор укладений у металеву порожнину, резонансні частоти змінюються таким чином:

- якщо накопичена енергія зміщеного поля здебільшого електрична, його

резонансна частота зменшиться;

- якщо збережена енергія зміщеного поля здебільшого магнітна, то його резонансна частота зростатиме.
- Найпоширенішою проблемою, яку виявляють діелектричні резонаторні схеми, є їх чутливість до перепадів температури та механічних коливань. Незважаючи на те, що останні вдосконалення матеріалознавства та виробництва пом'якшили деякі з цих питань, компенсаційні методи все ще можуть знадобитися для стабілізації продуктивності ланцюга за температурою та частотою.

Діелектричні резонатори призначені для заміни резонансних порожнин у мікрохвильових функціях, таких як фільтри та осцилятори. Використання діелектричного резонатора всередині цих функцій дозволяє дизайнерам отримати за низькою вартістю більшекомпактні пристрої з більш високим коефіцієнтом Q та стабільністю температури.

Якщо частоту ТЕ типу коливань краще зсувати переміщенням збуджуючого елемента паралельно площині діелектричного резонатора, хоча і частота НЕ моди теж буде змінюватись, але більш ефективно для НЕ переміщення збуджуючого елемента перпендикулярно циліндричній поверхні. Таким чином можлива перебудова резонансної частоти до 20...25%, однак для металевого збуджуючого елемента, краще не виходити за межі 5% перебудові частоті бо навантажена добротність починає швидко знижуватись і значно змінюється температурний коефіцієнт частоти. Для діелектричного збуджуючого елемента можлива максимальна перебудова частоти, без істотного змінення навантаженої добротності. А спеціальним підбором діелектрика з необхідним температурним коефіцієнти (ТКч) частоти для збуджуючого елемента, легко досягається корегування ТКч основного ДР.

Якщо у якості коливальної системи або її частини застосовується діелектричний резонатор, можливі декілька рішень електричної перебудови резонансної частоти ДР. Перебудову резонансної частоти ДР можна виконати наступними засобами: включенням у ДР варіконда або напівпровідникового приладу; включенням у ДР гіромагнітного нерезонансного вкладиша, магнітна проникність, котрого змінюється зовнішнім магнітним полем; пертурбація зовнішнього поля ДР тим чи іншим засобом. Засіб керування резонансною частотою ДР обирається в залежності від функцій НВЧ пристрою, вимог до добротності та масо-габаритних показників. Актуальність проблеми перебудови резонансної частоти діелектричного резонансного елемента стимулює пошук нових методів і засобів вирішення цієї задачі.

Засоби електричної перебудови частоти засновані на використанні ДР складовою частиною якого є нелінійний діелектрик, керований зовнішнім електричним полем або

включення у еквівалентний контур ДР напівпровідникових зосереджених або розподілених керованих елементів.

Пошуки вирішення проблеми електричної перебудови частоти показали, що можливий компроміс між збереженням відносно високої добротності ДР ті одержання невеликої перебудови частоти за допомогою плівкового діелектричного нелінійного елемента, така конструкція наведена у і являє собою комбіновану структуру з ДР та нелінійної плівки BST з планарними електродами, тобто зв'язану систему: ДР - шильний резонатор. При прикладанні поля здійснюється перебудова двох зв'язаних коливальних системи. Частота ДР перебудовується на 3 – 5%, при зниженні добротності у 5 – 10 разів.

Інший приклад ДР з електричною перебудовою частоти це ДР з радіальним металізованим прорізом у якому розташовано нелінійний сегнетоелектричний елемент включений послідовно у електричну складову поля діелектричного резонатора, що дозволило розширити межі перебудови і досягти 10%. Але добротність ДР впала у 10 разів.

Таким чином кінцева добротність ДР визначається діелектричними втратами сегнетоелектричного елемента, це означає, що перспектива такого напрямку перебудови частоти ДР залежить від здобутків у області розробки і технології нелінійних діелектричних плівок.

Включення у проріз ДР варакторного діода теж дає перебудову частоти 10%, добротність такої структури визначається добротністю варакторного діода, яка у кращому випадку, складає дві сотні у НВЧ діапазоні. Включення варакторного діода між діаметральними площинами половини ДР у формі кільця розширює перебудову частоти до 25% і знижує добротність цієї структури у 10 разів, що найменше. Таким чином, нелінійні напівпровідникові та діелектричні елементи забезпечують швидкодію але істотно погіршують добротність ДР.

Зниження добротності спостерігається у конструкціях резонаторів які поряд з діелектриками містять елементи з феритових матеріалів.

Властивості п'єзоелектричних та електрострикційних діелектричних матеріалів перетворювати електричну енергію у механічний рух надали поштовх для досліджень у напрямку електромеханічного керування амплітудою, фазою і частотою надвисокочастотного сигналу. Переваги такого способу перебудови у збереженні високої добротності діелектричного резонатора при перебудові його частоти більш ніж на 10%. Окрім того, сумісність з аналоговими і цифровими електронними вузлами, мала споживана потужність, термостабільність, радіаційна стійкість і т. д.

Найбільш численну групу пристроїв на діелектричних резонаторах складають фільтри. У їх числі смугові, режекторні фільтри та інші пристрої частотної селекції. Загальний принцип побудови смугових фільтрів на основі ДР - використання вхідної і вихідної лінії передачі, електромагнітний зв'язок між якими забезпечується внаслідок перевипромінювання енергії ДР. При цьому необхідно забезпечити розв'язку між вхідною і вихідною лініями передачі, що може бути досягнуто за рахунок розташування між ними відрізків позамежних хвильоводів, металевих діафрагм з отворами, або за рахунок вибору форми й орієнтації елементів зв'язку між ДР і лінії передачі. Для формування потрібної АЧХ фільтра треба забезпечити необхідний зв'язок вхідного і вихідного резонаторів із лініями передачі. Від цього зв'язку також залежать внесені фільтром втрати. Конструктивно зв'язок здійснюється або шляхом безпосереднього зв'язку ДР із вхідною і вихідною лініями передачі або шляхом розташування поблизу резонаторів штирів, витків, стрічкових провідників, що підключаються до вхідної і вихідної ЛП. Крім того, для одержання заданої АЧХ багаторезонаторних структур необхідно забезпечити необхідний ступінь взаємного зв'язку окремих ДР. Цей зв'язок здійснюється або через відрізки позамежних хвильоводів, або через відрізки лінії передачі.

Конструкції смугові фільтри можна розділити на два основних типи, що відрізняються розташуванням ДР один щодо одного.

Це фільтри із соосним і планарним розташуванням ДР в екрані. Найважливішою відмінністю перших є реалізація сильних взаємних зв'язків між резонаторами і мінімальних втрат в екрані. Основна перевага фільтрів із планарним розташуванням ДР зв'язана із простотою реалізації їх зв'язку із мікροстрічковими НВЧ- пристроями, виконаними за планарною технологією.

Принцип побудови режекторних фільтрів на ДР заснований на використанні електромагнітного зв'язку одного або кількох ДР із лінію передачі. У таких конструкціях звичайно використовується хвильовод, коаксіальна або мікροстрічкова лінії. На резонансній частоті системи хвильовод - ДР внаслідок поглинання і відбиття енергії ДР її проходження на вихід мінімальне.

При побудові фільтра потрібно забезпечити близькі до оптимальних параметри зв'язку кожного з резонаторів із лінію передачі, виходячи з заданого ослаблення сигналу на центральній частоті смуги загородження. Одночасно потрібне мінімальне ослаблення поза цією смугою. Завдяки малим розмірам і наявності зовнішніх полів ДР необхідні АЧХ фільтра створюються введенням ДР у поле регулярної лінії передачі. Підвищення частотної виборності фільтра досягають шляхом збільшення числа використаних ДР, або за рахунок використання ДР із виродженими ортогональними коливаннями, збудженими

із зміщенням по фазі на 90. Малі габарити і наявність зовнішніх полів ДР дозволяють створювати фільтри зі збільшеним рівнем загородження поза смугою пропускання. Це забезпечується вмиканням у поле коливальної системи смуго-пропускнуго фільтра додаткових ДР, що створюють режекторний фільтр із центральною частотою в смузі загородження смуго-пропускнуго фільтра.

Принцип побудови пристроїв для частотного поділу каналів полягає в забезпеченні зв'язку однієї вхідної лінії передачі одночасно з декількома ДР, що мають резонансні частоти, які збігаються з частотами каналів, що необхідно розділити. Основними елементами таких пристроїв є смугові фільтри, налаштовані на визначену частоту і підключені до відповідного входу. Входи усіх фільтрів об'єднані в загальний вхід розділювального пристрою.

Сполучення діелектричних фільтрів із феритовими циркуляторами дозволяє створювати пристрої частотного поділу, що мають властивість спрямованості передачі енергії.

Малі значення радіаційної добротності нижчих типів коливань ДР є фізичною передумовою створення нового класу мініатюрних резонансних антенних елементів, директорних елементів антенних систем, а також антенних решіток. Найпростіші випромінювачі на ДР виготовляють з одного ДР, збудженого лінією передачі й зв'язаного з вільним простором. Резонатори можуть працювати на нижчому Н- або Е-типі коливань. ДР розташовуються частково або цілком у вільному просторі. Робочі характеристики систем визначаються коефіцієнтами зв'язку ДР із ЛП та з вільним простором.

Велике практичне застосування ДР знайшли в твердотільних НВЧ-генераторах. Різноманіття конструкцій твердотільних генераторів із ДР можна умовно розділити на п'ять класів. До першого класу належать генератори у яких ДР використовується як зовнішній стабілізуючий резонатор, включений у вихідну лінію генератора. При такому використанні ДР реалізуються відомі схеми затягування частоти генерації стабілізуючим резонатором, зв'язок якого із резонансною системою генератора здійснюється по полях основної хвилі лінії передачі. До другого класу відносяться генератори, побудовані по одноконтурній схемі стабілізації частоти. Тут ДР є єдиним робочим резонансним контуром, на який через відрізок основної або додаткової лінії передачі навантажений активний елемент. При цьому задана частота генерації контролюється ДР. До третього класу можна віднести пристрої, у яких ДР є термокомпенсуючим елементом активного контуру генератора. У розглянутому класі генераторів ділянка лінії передачі має резонансний характер і частота генерації контролюється однією з частот зв'язку двоконтурної (системи ДР- ділянка лінії передачі). У наступному класі генераторів ДР

виконує функції резонансного елемента паралельного зворотного зв'язку. Такі генератори відрізняються від попередніх тим, що ДР утворює смуговий фільтр, у колі зворотного зв'язку. До останнього класу генераторів належать такі пристрої, у яких ДР використовується як основний контур, коли зв'язок ДР з активним елементом здійснюється по власних резонансних полях ДР через квазісосереджений нерезонансний елемент зв'язку.

Пристрої на ДР призначені для обробки НВЧ сигналів можуть бути розділені на два різновиди. В одному із них використовуються ДР у сполученні з додатковими елементами (напівпровідниковими елементами різного призначення, феритовими елементами або з сегнетоелектричною плівкою), а в другому тільки ДР. В першому випадку одержують мініатюрні конструкції як функціональних вузлів і пристроїв (частотних детекторів, активних фільтрів, керованих фільтрів, перетворювачів частот), так і цілих модулів НВЧ апаратури. На основі використання тільки властивостей ДР можуть бути побудовані сповільнюючі лінії, фазочастотні коректори, частотні дискримінатори.

Цікавим застосуванням ДР є побудова на їх основі періодичних структур, що являють собою протяжні системи однакових хвилеводних ланок із ДР. Такі конструкції можуть бути використані в НВЧ приладах як сповільнюючі системи. У фазочастотних коректорах використовується залежність фазочастотної характеристики лінії передачі з ДР від параметрів резонатора і ступеня його зв'язку з лінією передачі. Частотні дискримінатори на ДР мають різні конструкції і частіше усього будуються за аналогією з частотними дискримінаторами на основі об'ємних резонаторів.

Використання залежностей між резонансною частотою ДР і ϵ матеріалів, температурою навколишнього середовища, дозволяє створювати пристрої для виміру параметрів матеріалів. Становить інтерес для вимірів наявність залежності добротності ДР від $\tan \delta$ матеріалів і ступеня їхньої вологості. ДР у режимі збудження нижчого магнітного або електричного коливання являють собою датчики інтенсивності поля в місці їх розташування і тому можуть бути застосовані для дослідження розподілу поля в різноманітних електродинамічних структурах. Чутливість ряду НВЧ експериментів можна поліпшити, застосувавши ДР у якості концентраторів НВЧ поля.

Подальший прогрес у створенні пристроїв на ДР пов'язаний із вирішенням проблем високодобротного перестроювання резонансних частот, розрідження спектра власних коливань і поліпшення їх експлуатаційних характеристик.

Наші дослідження показали, що включення у резонатор регулюємої повітряної щільності (Δ) між його складовими частинами, дозволяє одержати перебудову резонансної частоти у досить широких межах. На цьому принципі нами побудовано складний

діелектричний резонатор із регулюванням частоти зовнішнім п'єзоактюатором. Резонансна частота основного типу коливань змінюється більш ніж на 30% при регулюванні щілини від нуля до декількох десятків мікрон. Особиста добротність ДР залишається такою, як і у монолітного ДР. На рис.1.17 наведені загальний вигляд та залежності резонансної частоти діелектричного резонатора від відстані між його половинами. Як бачимо, перебудова резонансної частоти достатня для багатьох застосувань.

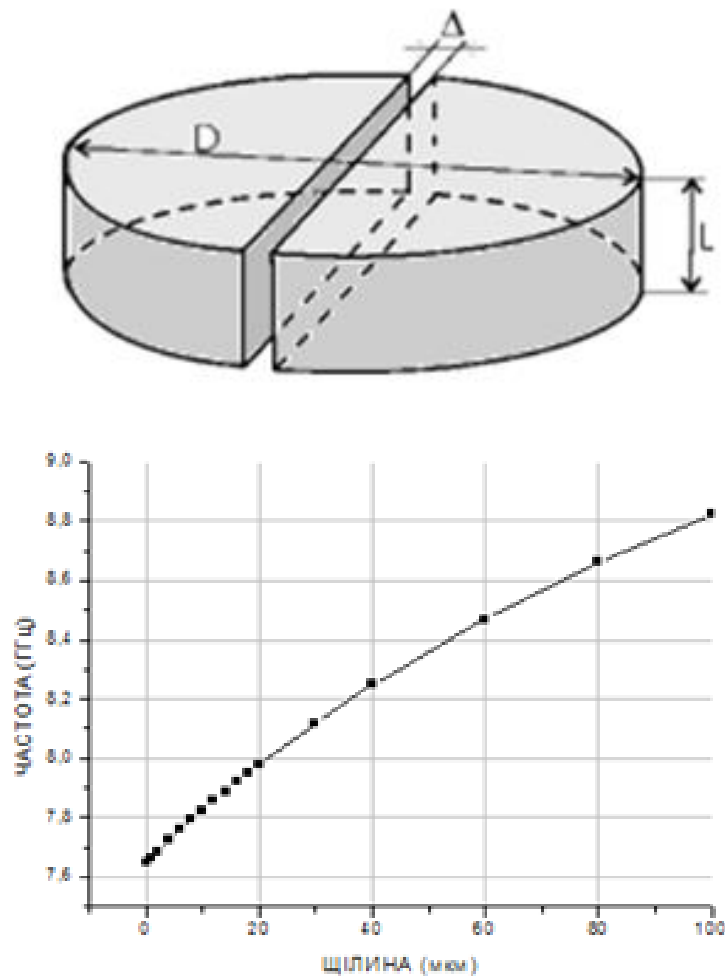


Рисунок 1.17 - Залежність резонансної частоти і добротності складеного діелектричного резонатора від відстані між його половинами.

1.4 Основні принципи реалізації НВЧ- пристроїв на діелектричних резонаторах.

Використовуючи розглянуті вище ДР і фільтри на їх основі (мультиплексери, подільники потужності) в поєднанні з напівпровідниковими приладами, можна створювати багатофункціональні твердотільні пристрої, що забезпечують, крім частотної вибірконості сигналу, стабілізацію частоти, управління рівнем, фазою, випромінювання

або прийом сигналу, а також ефективні системи радіоелектронної апаратури нового покоління в сантиметровому і міліметровому діапазонах волі. При цьому підвищується надійність, зменшуються маса, габаритні розміри, вартість і металоємність пристроїв.

Застосування ДР і фільтрів на їх основі в НВЧ-пристроях розглянуто в роботі . В даний час поряд з частотно-виборчими пристроями ДР широко застосовують в транзисторних і доданих НВЧ-генераторах в якості пристроїв стабілізації генеруючих коливань, які можна виконати на основі як смугового, так і режекторного фільтрів. Основні характеристики генераторів сантиметрового діапазону хвиль: відносна нестабільність частоти (0,6 ... 1) 10^{-6} С, вихідна потужність до 70 ... 80 мВт при ККД до 20%. Подальші зусилля розробників НВЧ-генераторів спрямовані на вирішення наступних завдань: створення багатофункціональних генеруючих пристроїв, що виконують одночасно функції генератора і маніпулятора (частотного, фазового); генератора, що забезпечує перебудову частоти при високій стабільності; багаточастотних генераторів; генераторів-перетворювачів частоти (самогетеродініруючих змішувачів) і т. д.

Наявність зовнішнього електромагнітного поля ДР, що обумовлює малі значення радіаційної добротності, дозволяє створювати ефективні випромінюють антенні елементи і решітки для хвиль з лінійною і круговою поляризацією. В цьому випадку при малих габаритних розмірах антен можна отримати високу вибірковість. Великий коефіцієнт посилення елементарних випромінювачів на ДР становить 5 ... 7 дБ, то коефіцієнт посилення лінійних решіток на їх основі досягає 15 ... 17 дБ. Подальші дослідження в цій області спрямовані на вирішення наступних проблем: створення ефективних випромінювачів дециметрового і міліметрового діапазонів хвиль; розробка методик їх розрахунку і настройки; синтез антенних пристроїв із заданими складними за формою діаграмами спрямованості (ДН); розробка моделей і методів дослідження, аналізу і синтезу антенних решіток на ДР; суміщення ДР-випромінювачів з активними елементами і створення на цій основі антенних систем з керованими характеристиками випромінювання (адаптивних в перспективі); застосування ДР для корекції характеристик існуючих антен НВЧ; використання плівкової технології виготовлення випромінювачів на ДР.

Застосування ДР в пристроях вимірювання параметрів діелектриків, матеріалів і середовищ дозволяє підвищити їх ефективність, чутливість і точність вимірювань, спростити конструкцію і зменшити масу та габаритні розміри. Для застосування ДР в якості різних датчиків інформації використовують залежно резонансної частоти і власної добротності ДР від діелектричної проникності, температури, вологості і втрат в навколишнє середовище. Основні напрямки робіт в цій галузі - створення простих, але

ефективних датчиків з вимірювання ϵ_d і $\operatorname{tg} \delta$ діелектриків, вологості матеріалів і газів, тиску середовища, інтенсивності електричного і магнітного полів; датчиків концентрації електромагнітного поля; розробка та обґрунтування методик і схем вимірювань із заданою точністю.

Для обробки НВЧ-сигналів використовують пристрої, виконані на основі або з використанням ДР, - це дискримінатори, фазовращатели, модулятори, що уповільнюють системи, фільтруючі пристрої з керованими параметрами, перетворювачі частоти, підсилювачі, помножувачі і т. Д

Для створення пристроїв обробки НВЧ-сигналів необхідно: проектування пристроїв, що володіють сукупністю різних функцій, розробка методів розрахунку їх електричних характеристик і параметрів, що відповідають заданим вимогам, а так-же побудова модулів радіоелектронної апаратури, що виконують функції НВЧ-приймачів. Розглянемо деякі багатофункціональні пристрої на основі ДР, що представляють інтерес для розробників радіоелектронної апаратури.

Унікальні властивості ДР (малі габарити і маса, висока добротність, стійкість до різних дестабілізуючих впливів, надійність і довговічність) стимулюють їх застосування у НВЧ- пристроях. Найбільш численну групу таких пристроїв складають фільтри. У їх числі смуго-пропускні, смуго-загороджуючі (режекторні) фільтри та інші пристрої частотної селекції.

Загальний принцип побудови смуго-пропускних фільтрів на основі ДР - використання входної і вихідної ЛП, електромагнітний зв'язок між якими забезпечується внаслідок перевипромінення енергії ДР .При цьому необхідно забезпечити добру розв'язку між входною і вихідною ЛП, що можебути досягнуто за рахунок розташування між ними відрізків позамежних хвилеводів, металевих перегородок з отворами, або за рахунок вибору форми й орієнтації елементів зв'язку між ДР і ЛП.

Для досягнення потрібної форми АЧХ фільтра треба забезпечити необхідний зв'язок входного і вихідного резонаторів із ЛП. Від цього зв'язку також залежать внесені фільтром втрати. Конструктивно зв'язок здійснюється або шляхом безпосереднього зв'язку ДР із входною і вихідною ЛП або шляхом розташування поблизу резонаторів штирів, витків дроту, стрічкових провідників, що підключаються до входної і вихідної ЛП. Крім того, для одержання заданої форми АЧХ багаторезонаторних структур необхідно забезпечити необхідний ступінь взаємного зв'язку окремих ДР. Цей зв'язок здійснюється або через відрізки позамежних хвилеводів, або через відрізки ЛП і залежить від та співвідношення розмірів ДР, типу і розмірів елементів розв'язки входної і вихідної ЛП, взаємного розташування ДР .

Конструкції смуго-пропускаючих фільтрів можна розділити на два основних типи, що відрізняються розташуванням ДР один щодо одного.

Це фільтри із соосним і планарним розташуванням ДР в екрані. Найважливішою відмінністю перших є реалізація сильних взаємних зв'язків між резонаторами і мінімальних втрат в екрані. Основна перевага фільтрів із планарним розташуванням ДР зв'язана із простотою реалізації їх зв'язку із мікрополосковими НВЧ-пристроями, виконаними запланарною технологією.

Принцип побудови режекторних фільтрів на ДР заснований на використанні електромагнітного зв'язку одного або кількох ДР із ЛП. У таких конструкціях звичайно використовується хвилевод, коаксіальна або мікрополоскова лінії. На резонансній частоті системи хвилевод-ДР внаслідок поглинання і відбиття енергії ДР її проходження на вихід мінімальне.

При побудові фільтра потрібно забезпечити близькі до оптимальних параметри зв'язку кожного з резонаторів із ЛП, виходячи з заданого ослаблення сигналу на центральній частоті смуги загородження. Одночасно потрібне мінімальне ослаблення поза цією смугою. Завдяки малим розмірам і наявності зовнішніх полів ДР необхідні АЧХ фільтра створюються введенням ДР у поле регулярної ЛП. Підвищення частотної виборності фільтра досягають шляхом збільшення числа використовуваних ДР, або за рахунок використання ДР із виродженими ортогональними коливаннями, збудженими із зміщенням по фазі на 90°.

Малі габарити і наявність зовнішніх полів ДР дозволяють створювати фільтри зі збільшеним рівнем загородження поза смугою пропускання. Це забезпечується вмиканням у поле коливальної системи смуго-пропускного фільтра додаткових ДР, що створюють режекторний фільтр із центральною частотою в смузі загородження смуго-пропускного фільтра.

Принцип побудови пристроїв для частотного поділу каналів полягає в забезпеченні зв'язку однієї вхідної ЛП одночасно з декількома ДР, що мають резонансні частоти, які збігаються з частотами каналів, що необхідно розділити. Основними елементами таких пристроїв є смуго-пропускні фільтри, настроєні на визначену частоту і підключені до відповідного входу. Входи усіх фільтрів об'єднані в загальний вхід розділювального пристрою.

Сполучення діелектричних фільтрів із феритовими циркуляторами дозволяє створювати пристрої частотного поділу, що мають властивість спрямованості передачі енергії.

Низькі значення радіаційної добротності нижчих типів коливань ДР є фізичною передумовою створення нового класу мініатюрних резонансних антенних елементів, директорних елементів антенних систем, а також антенних решіток. Найпростіші випромінювачі на ДР виготовляються з одного ДР, збуджуваного ЛП і зв'язаного з вільним простором. Резонатори можуть працювати на нижчому Н- або Е-типі коливань. ДР розташовуються частково або цілком у вільному просторі. Робочі характеристики систем визначаються коефіцієнтами зв'язку ДР із ЛП та з вільним простором.

Велике практичне застосування ДР знайшли в твердо тільних НВЧ- генераторах. Різноманіття конструкцій твердотільних генераторів із ДР можна умовно розділити на п'ять класів. До першого класу належать генератори у яких ДР використовується як зовнішній стабілізуючий резонатор, включений у вихідну лінію генератора. При такому використанні ДР реалізуються відомі схеми затягування частоти генерації стабілізуючим резонатором, зв'язок якого із резонансною системою генератора здійснюється по полях основної хвилі ЛП. До другого класу відносяться генератори, побудовані по одноконтурній схемі стабілізації частоти. Тут ДР є єдиним робочим резонансним контуром, на який через відрізок основної або додаткової ЛП навантажений активний елемент. При цьому задана частота генерації контролюється ДР. До третього класу можна віднести пристрої, у яких ДР є термокомпенсуючим елементом активного контуру генератора. У розглянутому класі генераторів відрізок ЛП має резонансний характер (з врахуванням пасивних елементів еквівалентної схеми напівпровідникового приладу) і частота генерації контролюється однією з частот зв'язку (що мало залежить від температури) двоконтурної (у першому наближенні) системи ДР- відрізок ЛП. У наступному класі генераторів ДР виконує функції резонансного елемента паралельного зворотного зв'язку. Такі генератори відрізняються від попередніх тим, що ДР утворює смуго-пропускний фільтр, у колі зворотного зв'язку. До останнього класу генераторів можуть бути віднесені такі пристрої, у яких ДР використовується як основний контур, коли зв'язок ДР з активним елементом здійснюється по власних резонансних полях ДР через квазісосереджений нерезонансний елемент зв'язку.

Пристрої на ДР призначені для обробки НВЧ- сигналів можуть бути розділені на два різновиди. В одному із них використовуються ДР у сполученні з додатковими елементами (напівпровідниковими елементами різного призначення, феритовими елементами або з сегнетоелектричною плівкою), а в другому тільки ДР. В першому випадку одержують мініатюрні конструкції як функціональних вузлів і пристроїв (частотних детекторів, активних фільтрів, керованих фільтрів, перетворювачів частот), так

і цілих модулів НВЧ апаратури. На основі використання тільки властивостей ДР можуть бути побудовані сповільнюючі лінії, фазочастотні коректори, частотні дискримінатори.

Цікавим застосуванням ДР є побудова на їх основі періодичних структур, що являють собою протяжні системи однакових хвильоводних ланок із ДР. Такі конструкції можуть бути використані в НВЧ-приладах як сповільнюючі системи. У фазочастотних коректорах використовується залежність фазочастотної характеристики ЛП з ДР від параметрів резонатора і ступеня його зв'язку з ЛП. Частотні дискримінатори на ДР мають різні конструкції і частіше усього будуються за аналогією з частотними дискримінаторами на основі порожнистих резонаторів.

Використання залежностей між резонансною частотою ДР і ϵ матеріалів, температурою навколишнього середовища, дозволяє створювати пристрої для виміру параметрів матеріалів. Становить інтерес для вимірів наявність залежності добротності ДР від $\tan \delta$ матеріалів і ступеня їхньої вологості. ДР у режимі збудження нижчого магнітного або електричного коливання являють собою датчики інтенсивності поля в місці їх розташування і тому можуть бути застосовані для дослідження розподілу поля в різноманітних електродинамічних структурах. Чутливість ряду НВЧ експериментів можна поліпшити, застосувавши ДР у якості концентраторів НВЧ-поля.

Подальший прогрес у створенні пристроїв на ДР пов'язаний із вирішенням проблем високодобротного перестроювання резонансних частот, розрідження спектра власних коливань і поліпшення їх експлуатаційних характеристик.

1.5. Перестроювання резонансних частот діелектричних резонаторів.

Функціональні можливості ДР можуть бути істотно розширені, якщо вдасться розв'язати задачу перебудови їх резонансних частот при збереженні добротності і термостабільності системи. Однозначного вирішення цієї задачі поки що нема, а запропоновані способи перестроювання дозволяють керувати резонансною частотою тільки в невеликих межах. Це керування може бути реалізовано різними способами, серед яких виділяють: механічний, електричний, магнітний, електромеханічний.

Принцип механічної перебудови резонансної частоти коливань ДР заснований на збуренні зовнішнього поля ДР рухомими нерезонансними елементами (металевими і діелектричними штирями, пластинами або дисками) або за рахунок відносного переміщення частини комбінованого резонатора чи інших зв'язаних із ДР коливальних систем. Діапазон перестроювання резонансної частоти ДР за допомогою тонких гвинтів лежить у межах 2...3%. При перестроюванні за допомогою металевих шайб або пластин чи діелектричних пластин та дисків діапазон зміни частоти збільшується приблизно до 10%. Використання ДКР дозволяє ще дещо збільшити діапазон перестроювання частоти.

Способи електричного перестроювання частоти засновані на застосуванні в ролі ДР або його складової частини нелінійних діелектриків, напівпровідникових зосереджених або розподілених елементів.

Так була створена система, що забезпечила невелике електричне підстроювання частоти за допомогою плівкового елемента з нелінійного діелектрика. Конструкція, у якій реалізований цей принцип керування, описана в [1] і являє собою комбіновану резонансну структуру з лінійного діелектрика з малим ϵ і високою ϵ , що не залежить від напруженості електричного поля, і плівки параелектрика, нанесеного на підложку з низькою ϵ . Прикладене до цієї плівки електричне поле впливає на електрофізичні параметри плівки і змінює характеристики всієї резонансної структури. При нанесенні на поверхню багат шарової діелектричної структури планарних металевих електродів, розглянута структура являє собою зв'язану систему: ДР - щілинний резонатор. При зміні керуючої напруги, що подається на електроди, відбувається перестроювання двох зв'язаних коливань системи. Одне з цих коливань - низькодобротне (щілинне) змінює резонансну частоту майже на 25...30 % під дією керуючої електричної напруги. Друге коливання - високодобротне (діелектричне) перестроюється при цьому усього на 3...5 % при одночасному зменшенні добротності в 5...10 разів.

Конструктивним різновидом ДР з електричним перестроюванням частоти з використанням нелінійних діелектриків є кільцевий діелектричний резонатор із радіальним прорізом, до металізованих стінок якого приєднані виводи нелінійного елемента. Для основного типу коливань ДР його електричні силові лінії замикаються на металізовані площини радіального прорізу. Нелінійна ємність, безпосередньо включена в ДР, дозволяє розширити діапазон перебудови частоти до 10 %, однак через підключення

нелінійної ємності добротність ДР зменшується в 10 разів. Оскільки низька добротність ДР, що містять нелінійні діелектрики, визначається значеннями $\tan \delta$ останніх, то перспектива подальшого розвитку такого способу перебудови частоти пов'язана з удосконалюванням технології одержання сегнетоелектричних плівок.

Для здійснення електричного перестроювання частоти ДР можливе вмикання в нього напівпровідникових керуючих елементів. При цьому досягається високий діапазон перестроювання частоти ДР із досить малими керуючими напругами. Так, підключення до металізованих електродів кільцевого ДР із радіальною щілиною в ролі нелінійного елемента варакторного діода, дозволяє управляти частотою в діапазоні до 10%. Однак добротність такого резонатора складає декілька сотень. Підключення варакторного діода до металізованих діаметральних площин напівкільцевого резонатора дозволяє збільшити діапазон перебудови частоти до 20...25% з одночасним зменшенням на порядок власної

добротності . Зменшення зв'язку ДР із напівпровідниковим елементом (за рахунок часткового вмикання в еквівалентний контур ДР) дозволяє підвищити ефективну власну добротність керованого в такий спосіб ДР. Однак при цьому зменшується діапазон перестроювання.

Поряд із безпосереднім вмиканням у ДР, напівпровідникові елементи можуть входити до складу інших зв'язаних з ДР резонансних структур. У роботі розглядається система ДР - мікрополосковий резонатор, навантажений на варакторний діод. Збільшення еквівалентної ємності й індуктивності діода призводить до зменшення ефективної довжини полоскового провідника для непарних мод коливань, що викликає зміну резонансної частоти системи. Основним фактором, що впливає на діапазон перестроювання, є величина коефіцієнта зв'язку ДР із відрізком

мікрополоскової лінії, віднесена до середньгеометричного їх добротностей. Величина добротності (на частотах зв'язку) обмежена значенням власної добротності мікрополоскового резонатора і добротності застосовуваних варакторних діодів і складає декілька сотень. Використання симетричного вмикання варакторних діодів у мікрополосковий резонатор дозволяє збільшити (до 20 %) діапазон перестроювання , але при цьому потрібно істотне підвищення точності розрахунку геометрії системи для виводу резонаторів на задані частоти, тому що експериментальне підстроювання частоти мікрополоскового резонатора утруднене.

Для збільшення діапазону перестроювання при збереженні навантаженої добротності можна використовувати коливальну систему, у якій діоди включені в розриви металевого кільця, встановленого над ДР . Однак, діапазон перестроювання обмежений тим, що перестроювання супроводжується значним зниженням добротності ДР. Більш високу добротність ДР вдається одержати в конструкції, де ДР розташований під провідним диском, розбитим на металеві сегменти, між якими включені варакторні діоди . Однак поряд із високою добротністю ДР діапазон перебудови частоти малий (менше 1 %).

Таким чином, застосування електрично керованих елементів у різних конструкціях ДР дозволяє забезпечити високу швидкодію і малі потужності керування при значному погіршенні добротності.

Керування резонансною частотою ДР можливе в конструкціях резонаторів, що містять поряд із діелектриком елементи з феритних матеріалів. При цьому ферит повинен бути розташований у зазорі магнітної системи, що створює керуюче магнітне поле. При слабких полях підмагнічування внаслідок зміни магнітної проникності ферита відбувається зміна резонансної частоти комбінованого ферито-діелектричного резонатора.

Існує декілька різновидностей подібних керованих ДР. В одній із них може бути використаний кільцевий ДР, центральна порожнина якого заповнена полікристалічним феритом, а поле підмагнічування прикладене по дотичній до торцевої поверхні ДР. У цій конструкції ферит розташований в області максимальної напруженості магнітного поля ДР і його вплив позначається як на частоті, так і на добротності коливальної системи. З ростом напруженості поля підмагнічування має місце майже 10%-не перестроювання резонаторів по частоті і зміна їх добротності. При цьому мінімальна добротність істотно менше добротності окремо взятого ДР і суттєво залежить від співвідношення об'ємів ферита і діелектрика. Із зменшенням об'єму ферита добротність системи зростає при одночасному зменшенні діапазону перестроювання частоти.

Другий різновид конструкції ДР із магнітним перестроюванням резонансної частоти являє собою кільцевий ДР із розташованим усередині нього гіромагнітним резонатором із монокристалу ферита. Замість кільцевого ДР можна застосувати два поруч розташовані циліндричних резонатори, між якими розташовано гіромагнітний резонатор. У даному випадку резонатор являє собою зв'язану коливальну систему. При зміні поля підмагнічування в області частот, що відповідають феромагнітному резонансу, відбувається перестроювання частот зв'язку. Діапазон перестроювання частоти істотно залежить від співвідношення розмірів діелектричного і гіромагнітного резонаторів. Наприклад, для гіромагнітного резонатора у формі кулі при збільшенні діаметра від 0.8 мм до 2.6 мм діапазон перестроювання частоти ДР у 3-сантиметровому діапазоні довжин хвиль збільшується від 0.2 до 1.2 ГГц. При перестроюванні частоти порядку на 13% добротність зв'язаного колювання змінюється майже в 4 рази. Таким чином, загальною властивістю керованих коливальних систем із ДКР

на основі нелінійних діелектриків та феритів, є одночасне зменшення добротності колювань ДР у 2...10 разів.

У останні роки використовуються керовані ДР із застосуванням п'єзоелектричних матеріалів. При такому способі керування частотою ДР здійснюється шляхом переміщення елементів, що збурюють поле ДР, за рахунок деформації п'єзоелементу, керованого зовнішньою електричною напругою. Перевага такого способу перестроювання полягає в збереженні високої добротності ДР при зміні його частоти в смузі не менше 10%. У роботі виділені такі переваги п'єзоелектричного способу перестроювання частоти ДР як електрична розв'язка між входом і виходом, висока радіаційна стійкість, збереження працездатності у широкому інтервалі кліматичних впливів, низька собівартість і простота керуючого пристрою, висока стійкість до дії агресивних середовищ, можливість узгодження з аналоговими, та цифровими

електронними схемами. Показано ефективність використання такого способу перебудови на частотах понад 20 ГГц.

Одним із перспективних шляхів розширення можливостей пристроїв з електромеханічним керуванням є використання ДКР із Е - типом коливань. Проведені нами дослідження показали, що використання в таких структурах повітряного зазору в ролі неоднорідності дозволяє одержати значне перестроювання резонансних частот при зберіганні досить високої добротності коливальної системи. Так для ДКР, виготовлених із кераміки ТБНС, у сантиметровому діапазоні резонансна частота основного типу коливань змінюється більш ніж на 30°C при зміні ширини повітряного зазору від нуля до кількох десятків мікрометрів.

Крім того можливе створення фільтрів, фазообертачів та інших селективних пристроїв НВЧ із електричним керуванням параметрами заснованим на використанні резонансних і перемикаючих властивостей

напівпровідникових приладів, наприклад р-і-п - діодів, що є типовими резонаторами з Е- типом коливань у міліметровому діапазоні.

Одним із можливих методів керування резонансною частотою напівпровідникових комбінованих резонаторів може стати використання MEMS- структур (MEMS - мікроелектромеханічні системи), які можуть бути виготовлені за інтегральною технологією.

Тому використання комбінованих резонаторів з Е - типом коливань є досить перспективним для створення приладів НВЧ з керованими характеристиками.

2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПЬЕЗОЕЛЕКТРОНІКИ

Робота різних приладів пьезоелектроніки заснована на пьезоелектричному ефекті, який був відкритий в 1880 р французькими вченими братами П. Кюрі і Ж. Кюрі. Слово п'єзоелектрика означає електрику під тиском. Прямий п'єзоелектричний ефект полягає в тому, що при тиску на деякі кристалічні тіла, на протилежних гранях цих тіл виникають рівні, але різні за знаком електричні заряди. Якщо змінити напрямків деформації, т. д. не стискати, а розтягувати п'єзоелектрику, то заряди на гранях змінять знак на зворотний [14].

До п'єзоелектрики відносяться деякі природні або штучні кристали, наприклад кварц або сегнетова сіль, а також спеціальні пьезокерамічні матеріали, наприклад титанат барію. Крім прямого п'єзоефекту застосовується також зворотний п'єзоефект, який полягає в тому, що під дією електричного поля пьезоелектрика стискається або розширюється в залежності від напрямку вектора напруженості поля. У кристалічних пьезоелектриків інтенсивність прямого і зворотного п'єзоефекту залежить від того, який напрямок щодо осей кристала механічної сили або напруженість електричного поля.

Для практичних цілей застосовують п'єзоелектрики різної форми: прямокутні або круглі пластинки, циліндри, кільця. З кристалів такі п'єзоелементи вирізають певним чином, дотримуючись при цьому орієнтування щодо осей кристала. П'єзоелемент поміщають між металевими обкладинками або наносять металеві плівки на протилежні грані п'єзоелемента. Таким чином виходить конденсатор з діелектрикою з п'єзоелектронікою.

Якщо до такого п'єзоелементи підвести змінну напругу, то п'єзоелемент за рахунок зворотного п'єзоефекту буде стискатися і розширюватися, т. Е. Здійснюючі механічні коливання. У цьому випадку енергія електричних коливань перетворюється в енергію механічних коливань з частотою, рівній частоті прикладеного змінного напруги. Так як п'єзоелемент має певною частоту власних механічних коливань, то може спостерігатися явище резонансу [14]. Найбільша амплітуда коливань пластинки п'єзоелемента виходить при збігу частоти зовнішньої ЕРС з власною частотою коливань пластинки. Слід зазначити, що є кілька резонансних частот, які відповідають різним типам коливань пластинки.

Під впливом зовнішньої змінної механічної сили на п'єзоелементі виникає змінна напруга тієї ж частоти. В цьому випадку механічна енергія перетворюється в електричну до п'єзоелемент стає генератором змінної ЕРС. Можна сказати, що п'єзоелемент є коливальні системою, в якій можуть відбуватися електромеханічні коливання. Кожен п'єзоелемент еквівалентний коливального контуру. У звичайному коливальному контурі, складеному з котушки і конденсатора, періодично здійснюється перехід енергії електричного поля, зосередженої в конденсаторі, в енергію магнітного статі котушка і навпаки. У п'єзоелементі механічна енергія періодично переходить в електричну.

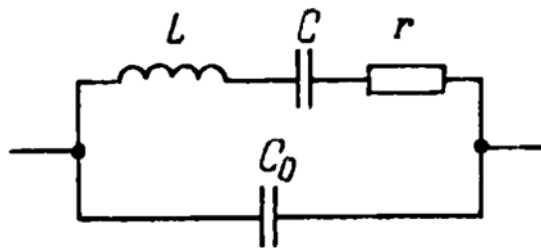


Рисунок 2.1 Еквівалентна схема п'єзоелемента

В еквівалентній схемі п'єзоелемента на рис. 2.1 індуктивність L відображає інерційні властивості п'єзоелектричної пластинки, ємність C характеризує пружні властивості пластинки і активний опір r - втрати енергії при коливаннях. Ємність C_0 , є

статичною, являє собою звичайну ємність між обкладинками пьезоелемента і не пов'язана з його коливальними властивостями.

2.1 П'єзоелектричні кристали

П'єзоелектричні кристали - одне з багатьох джерел енергії невеликого масштабу. Щоразу, коли п'єзоелектричні кристали механічно деформуються або піддаються вібрації, вони генерують невелику напругу, зазвичай відоме як п'єзоелектрик. Ця форма відновлюваної енергії не ідеально підходить для промислової ситуації.

Здатність певних кристалів генерувати п'єзоелектричність у відповідь на прикладене механічне напруження оборотна тим, що п'єзоелектричні кристали при впливі зовнішнього напруги можуть змінювати форму на невелику кількість. Ця деформація, хоча і лише нанометри, має корисні програми, такі як виробництво та виявлення звуку.

Напевно, найвідоміше використання кристалів п'єзоелектриків - у прикурювачі електричних сигарет. Тут натискання кнопки спричиняє удар пружинним молотком п'єзоелектричного кристала, велика напруга, що створюється цим, запалює газ, коли струм стрибає через невеликий іскровий проміжок. Ця методика застосовується також до деяких газових запальничок, які використовуються на газових грилях або плитах.

Ще одне поширене використання джерела енергії кристалів п'єзоелектриків - це створення невеликого двигуна; наприклад, що використовується в рефлекторній камері для роботи системи автофокусування. Ці двигуни працюють вібрацією. Дві поверхні змушені вібрувати при фазовому зсуві 90 градусів синусоїдою, що генерується на резонансній частоті двигунів. Це зумовлює силу тертя, коли дві поверхні зустрічаються, і коли одна з поверхонь закріплена, інша змушена рухатися.

Було встановлено, що п'єзоелектричні кристали, вбудовані в підшву взуття, можуть давати невелику кількість енергії з кожним кроком. Це може бути застосовано таким чином, що потужність для таких інструментів, як смолоскипи, стільникові телефони та інші розважальні пристрої, може бути отримана від руху оператора.

Перший п'єзоелектричний ефект був започаткований у 1880 році братами Жак Кюрі та П'єром. Додавши свої знання про п'єзоелектрику з поведінкою кристалічної структури, вони підтвердили цей ефект, використовуючи приклади п'єзоелектричних кристалів, таких як кварц, турмалін, тростинний цукор, сока Рошеля та топаз. Під час їх першої демонстрації вони показали, що кристали солі Рошеля і кварцові кристали виявляли найбільшу п'єзоелектричну ємність. Під час Другої світової війни дослідники у США, Росії та Японії виявили штучні матеріали, названі фероелектриками. Основна функція цих матеріалів - демонструвати п'єзоелектричні константи в кілька разів, які перевершують звичайні п'єзоелектричні матеріали.

Незважаючи на те, що початковий комерційно розроблений п'єзоелектричний матеріал є кварцовим кристалом, який використовується для детектування сонару, дослідники продовжували шукати високоякісні ресурси для матеріалів. Це сильне дослідження дало результат розширення двох таких матеріалів, як титанат цирконату свинцю, титанат барію. Ці матеріали мають деякі особливості, які підходять для конкретного застосування.

- Застосування п'єзоелектричного кристала включає наступне.
- Найкраще застосування п'єзоелектричного кристала - електрична прикурювач.
- Поширене застосування п'єзоелектрично-кристалічного джерела енергії полягає у створенні крихітного двигуна.
- П'єзоелектрики-кристали вбудовуються у взуттєву підошву взуття для отримання електричної енергії для кожного кроку. Це можна застосувати в таких інструментах, як мобільні телефони, смолоскипи тощо.

Таким чином, це все про п'єзоелектрики-кристали. З наведеної вище інформації, нарешті, можна зробити висновок, що в майбутньому для захисту прикордонних доріг можна використовувати п'єзоелектричну кристалізовану дорожню технологію. Ця технологія використовує датчик для пошуку проникнення ворогів. Якщо ця технологія реалізується, буде шанс стати електростанцією. Таким чином, його можна перетворити на наступне перспективне джерело електроенергії.

2.2 П'єзоелектричні матеріали

П'єзоелектричні матеріали - це матеріали, які виробляють електричний струм, коли вони розміщуються під механічним навантаженням. П'єзоелектричний процес також є оборотним, тому якщо застосувати електричний струм до цих матеріалів, вони насправді трохи змінять форму (максимум 4%).

Є декілька відомих нам матеріалів, які мають п'єзоелектричні властивості, включаючи кістки, білки, кристали (наприклад, кварц) та кераміку (наприклад, титанат цирконату свинцю).

Однак у травні 2012 року було оголошено, що вчені Каліфорнійського університету в Берклі знайшли механізм використання п'єзоелектрики від вірусів. Це перший раз, коли біологічні п'єзоелектричні матеріали - це матеріали, які мають здатність генерувати внутрішній електричний заряд від прикладеного механічного напруження.

Матеріали, що виявляють п'єзоелектричний ефект, також демонструють зворотний п'єзоелектричний ефект (його також називають зворотним або зворотним

п'єзоелектричним ефектом). Зворотний п'єзоелектричний ефект - це внутрішнє генерація механічного деформації у відповідь на прикладене електричне поле.

Кристали були першим матеріалом, використаним у ранніх експериментах з п'єзоелектриком. Брати Кюрі, П'єр і Жак, вперше довели прямий п'єзоелектричний ефект у 1880 році. Брати розширили свої знання про кристалічні структури та піроелектричні матеріали (матеріали, що створюють електричний заряд у відповідь на зміну температури).

Вони вимірювали поверхневі заряди наступних питомих кристалів:

- Тростинний цукор
- Турмалін
- Кварц
- Топаз
- Сіль Рошель (тетрагідрат натрію калію)

Сіль кварцу та Рошеля продемонструвала найвищі п'єзоелектричні ефекти.

Однак брати Кюрі не передбачили зворотного п'єзоелектричного ефекту. Зворотний п'єзоелектричний ефект був математично виведений Габрієлем Ліппманом у 1881 р. Потім Кюрі підтвердив ефект і надав кількісне підтвердження оборотності електричних, пружних та механічних деформацій у п'єзоелектричних кристалах.

До 1910 року 20 класів природних кристалів, в яких виникає п'єзоелектричність, були повністю визначені та опубліковані у «Lehrbuch Der Kristallphysik» Волдемара Войта . Але це залишалося незрозумілою і високо технічною нішею галузі фізики без видимих технологічних чи комерційних застосувань.

Далі наведено неповний список п'єзоелектричних кристалів з деякими короткими характеристиками їх використання.

Природні кристали:

- Кварц. Стабільний кристал, що використовується в годинникових кристалах і кристалах еталонних частот для радіопередавачів.
- Сахароза (столовий цукор)
- Сіль Рошель. Виробляє велику напругу при стисненні; використовується в ранньокристалічних мікрофонах.
- Топаз
- Турмалін
- Берлініт (AlPO_4). Рідкісний фосфатний мінерал, структурно ідентичний кварцу.

Рукотворні кристали:

- Ортофосфат галію (GaPO_4), аналог кварцу.
- Лангазит ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), аналог кварцу.

П'єзоелектрична кераміка:

- Титанат барію (BaTiO_3). Перше виявлено п'єзоелектричну кераміку.
- Титанат свинцю (PbTiO_3)
- Титанат свинцевого цирконату (PZT). В даний час найбільш часто використовується п'єзоелектрична кераміка.
- Ніобат калію (KNbO_3)
- Ніобат літію (LiNbO_3)
- Танталат літію (LiTaO_3)
- Вольфрама натрію (Na_2WO_4)

П'єзокераміка без свинцю:

- Ніобат калію натрію (NaKNb). Цей матеріал має властивості, схожі на PZT.
- Ферит вісмуту (BiFeO_3)
- Ніобат натрію (NaNbO_3)

Біологічні п'єзоелектричні матеріали:

- Деревина
- Шовк
- Емаль
- Дентин
- Колаген

П'єзополімери : П'єзополімери мають легку вагу та невеликі розміри, завдяки чому зростає популярність для технологічного застосування.

Полівініліденфторид (PVDF) демонструє п'єзоелектричність, яка в кілька разів більша, ніж кварц. Його часто використовують у галузі медицини, наприклад, у медичних швах та медичному текстилі.

П'єзоелектричні матеріали застосовуються в багатьох галузях промисловості, включаючи:

- Виробництво
- Медичні прилади
- Телекомунікації
- Автомобільна

- Інформаційні технології (ІТ)

Розумні матеріали - це широкий клас матеріалів, властивості яких можуть бути змінені контрольованим методом зовнішнім стимулом, таким як рН, температура, хімічні речовини, прикладене магнітне або електричне поле або напруга. Розумні матеріали також називають інтелектуальними функціональними матеріалами.

П'єзоелектричні матеріали відповідають цьому визначенню, оскільки прикладена напруга створює напругу в п'єзоелектричному матеріалі, і, навпаки, застосування зовнішнього напруги також виробляє електроенергію в матеріалі.

Додаткові розумні матеріали включають сплави пам'яті форми, галохромні матеріали, магнітокалорійні матеріали, температурно-чутливі полімери, фотоелектричні матеріали та багато, багато іншого.

2.2.1 Чому п'єзоелектричні матеріали цікаві?

Уявіть, що ви йдете вулицею і заряджаєте телефон, коли ви йдете, заряджаючи ноутбук, набравши текст, або живіть нічним клубом, танцюючи на п'єзоелектричному поверсі! Поняття п'єзоелектрики існує приблизно з 1880-х років, і його відкрили Жак і П'єр Керрі. Незважаючи на те, що вже використовується в таких речах, як запальнички, для створення іскри, яка запалює газ, використання його як повсякденного джерела енергії ще далеко.

Проблеми з сучасними п'єзоелектричними матеріалами

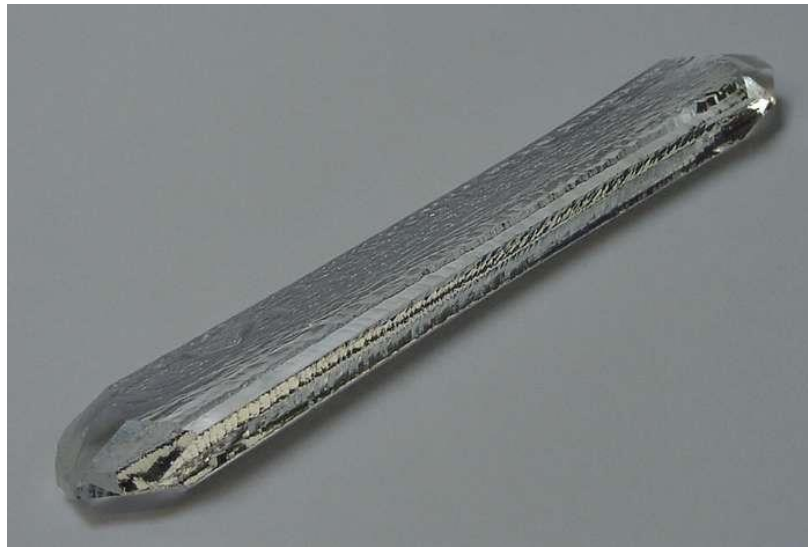
В даний час ми стикаємося з трьома проблемами, намагаючись використати п'єзоелектрику як життєздатний метод виробництва електроенергії:

- Найголовнішим питанням є те, що кількість виробленої електроенергії настільки мала, тому якби не було встановлено величезних установок, вона просто не мала б сили жити наші останні гаджети.
- Струм виробляється лише тоді, коли застосовується механічне напруження, тому шойно ви перестаєте стискати матеріал, заряд не виробляється.
- Остаточне питання полягає в тому, що до цих пір багато стартових продуктів, необхідних для виробництва п'єзоелектричних матеріалів, токсичні і з ними важко працювати.

3.МОНОКРИСТАЛИ

Монокристал , будь-який твердий предмет, в якому впорядковане тривимірне розташування атомів, іонів або молекул повторюється протягом усього об'єму. Певнамінерали , такі як кварц і дорогоцінні камені, часто зустрічаються як

монокристали;синтетичні монокристали, особливо арсенід кремнію та галію, використовуються в твердотільних електронних пристроях, таких як інтегральні схеми та світлодіоди (світлодіоди)[15].



При приготуванні синтетичних монокристалів застосовуються спеціальні методи контролю за осадженням матеріалу на одному ядрі, який часто є невеликим монокристалом речовини, отриманого з попереднього препарату.

Монокристал часто має характерні площинні грані та деяку симетрію. Фактична форма кристала визначатиметься наявністю матеріалу, що кристалізується, та інтерференцією з іншими кристалами, але кути між гранями будуть характерними для матеріалу і визначатимуть ідеальну форму. Монокристали, що показують ці характерні форми, можуть бути вирощені з сольових розчинів, таких як квасцо і мідний купорос.

Коштовні камені часто є монокристалами. Вони, як правило, вирізаються штучним шляхом для отримання естетично приємних заломлюючих та відбиваючих властивостей. Це, як правило, вимагає різання вздовж кристалографічних площин[16]. Це відомо як розщеплення кристала. Знайомий приклад - алмаз, з якого декоративні камені можуть бути відщеплені різними способами для отримання широкого спектру ефектів.

Більшість монокристалів виявляють анізотропію за певними властивостями, такими як оптичні та механічні властивості. Аморфна речовина, наприклад, віконне скло, має тенденцію до ізотропності . Ця різниця може дати можливість розрізнити склянку і кристал. Характерна форма деяких монокристалів - це підказка, що властивості матеріалу можуть бути напряму залежними. Властивості полікристалічних зразків можуть бути повністю ізотропними або сильно анізотропними залежно від характеру матеріалу та способу його формування.

3.1 Роль монокристалів у створенні нових матеріалів

Що стосується створення нових матеріалів, монокристали відіграють важливу роль у поданні чіткішої картини властивостей матеріалу. Типовий матеріал буде складатися з безлічі менших кристалів, і межі зерен між цими кристалами можуть виступати як перешкоди, впливаючи на властивості, такі як електричний або термічний опір.

"Ці межі можуть мати глибокі наслідки, як хороші, так і погані", - сказав науковець з матеріалів лабораторії Ames і заступник директора Том Лограссо. "Взагалі матеріал, що мають менші та менші кристали, насправді мають покращені механічні властивості.

Виняток із цього правила полягає в тому, що при високій температурі відносно точки плавлення невеликі кристали можуть мати тенденцію ковзати повз один одного, властивість називається повзучості. З цієї причини лопатки турбіни в деяких реактивних двигунах або генераторах фактично утворюються з монокристалів сплаву на основі нікелю. Кілька інших щоденних застосувань із застосуванням монокристалів - це напівпровідники, детектори, такі як датчики інфрачервоного випромінювання та випромінювання та лазери.

"Активний компонент лазера - це монокристал" , - сказав Лограссо, який також є доцентом Державного університету Айови, професором матеріалознавства та техніки, - тому що межі кристалічного зерна розсіяли б світло ".

З точки зору дослідження, особливо при створенні нового матеріалу, вчені хочуть видалити якомога більше змінних, щоб найкраще зрозуміти властивості матеріалу. Основний спосіб зробити це - почати з максимально чистої сировини і отримувати матеріал як монокристал. "Ви не хочете дефектів кристалічної структури і не хочете домішок, які можуть стати джерелом додаткового зародження", - сказав Лограссо. "Нові матеріали можуть мати нову фізику. Ми можемо визначити, що це таке, якщо ми будемо проводити вимірювання на чистому первозданному зразку (тобто монокристалі). І якщо це робити послідовно, ми можемо порівняти інші матеріали та побачити, як це відповідає до нашого розуміння конкретної поведінки ".

Вчені Ames Laboratory використовують ряд методів вирощування монокристалів, кожен з яких підходить для отримання кристалів з різних видів матеріалів. Однак основне приміщення одне і те ж - перенаситити розчин, а потім осадити кристал.

"Дітей ми знайомимо з додаванням кам'яної солі або цукру в гарячу воду, поки ви не перенаситите рідину", - сказав Лограссо. "Потім, коли вода охолоджується і з часом починає випаровуватися, кристали солі або цукру починають утворюватися, а потім ростуть.

Ви можете зробити те ж саме з будь-якими двома матеріалами, використовуючи один як розчинник, а потім використовуючи тепло або високі температури для перенасичення розчинника", - продовжив він. "Найскладніша частина полягає в тому, щоб спочатку формувати монокристал, а потім ростити".

Це "мистецтво практикуючого" вимагає терпіння та майстерності, хоча різні методи, описані тут, також надають певну допомогу. Як правило, високий градієнт температури також сприяє стабільному переходу росту від рідкого до твердого.

Метод Брідгмана

Один з найвідоміших методів - техніка Брідгмана - названа на честь фізики з Гарварда Персі Вільямса Брідгмана - використовує тигель із загостреним конічним кінцем. Ця тонка точка сприяє зростанню монокристала, коли тигель виходить з нагрітої частини печі. Нагрівання подається через нагрівальний елемент, подібний тому, який знаходиться в домашній печі (опір) або через магнітне поле (індукція).

"Тиглі старіють з часом і стають кращими при виробництві монокристалів", - сказав Лограссо. "На жаль, ви іноді ламаєте тигель, видаляючи кристал. Оскільки вони ростуть всередині тигля, кристали, утворені таким чином, також можуть розвивати напруження, такі як тріщини або порожнечі".

Ames Laboratory також має спеціальну піч Брідгмана, яка дозволяє вирощувати кристали при більш високих тисках - до 15 Бар. Це дозволяє вирощувати кристали із сплавів, які містять летючі компоненти. Високий тиск заважає цим компонентам, які мають нижчу температуру кипіння, ніж інші компоненти сплаву, спалахувати як пара, перш ніж кристал може утворитися.

Ця піч використовує індукційний нагрів, який забезпечує більш крутий градієнт температури, що дозволяє швидше швидкості росту кристалів додатково мінімізувати випаровування та реакцію з тигелем.

Техніка Чохральського

Цей метод також нагріває матеріал в тиглі, але тут кристал фактично витягується з розплавленого розчину. Лограссо уподібнює це запалюванню свічки, "за винятком лише одного разу".

Насінневий кристал матеріалу кріпиться до кінця стрижня. Стержень опускають до тих пір, поки насінний кристал просто не торкнеться поверхні розплавленого матеріалу в тиглі. Потім стрижень обертають і відводять дуже повільно, витягуючи з рідини щойно утворений кристал.

"Оскільки кристал є самостійним, він не має напружень, які ви іноді отримуєте методом Брідгмана", - сказав Лограссо. "Залежно від матеріалу, кристали також можуть

бути діаметром 60 см або більше і довжиною кілька футів. Це дуже поширений метод отримання великих кристалів кремнію, які нарізані пластинами для використання в напівпровідниках".

Техніка поплавкової зони

Техніка оптичної поплавкової зони використовує сфокусоване, високо інтенсивне світло для створення монокристалів, особливо тих, що містять оксиди металів. За словами доцента Юнга Лю, методика пропонує кілька переваг для вирощування багатьох видів кристалів.

"Без контейнера - вам не потрібно або використовувати тигель для вирощування кристала, щоб він виключав будь-яку потенційну реакцію між зразком і контейнером", - сказав Лю. "Оскільки зона розплаву дуже сфокусована і вузька, ми можемо досягти дуже великого градієнта температури між твердою і рідкою фазами, що призводить до високоякісного росту кристалів".

Типова піч з оптичною поплавковою зоною складається з чотирьох потужних галогенових лампочок, розташованих кільцем навколо зразка. Напівсферичні відбивачі навколо кожної колби фокусують інтенсивну енергію світла у вузькій смузі навколо зразка при температурі до 2100 градусів Цельсія.

Сам злиток зразка починається з двох частин. Більш коротка «насінна» сторона знаходиться на дні і тримається в основі. Більш довга сторона "подачі" підвішується тісно над насіннєвою стороною. Коли дві сторони починають плавитися, на кожній поверхні збирається невеликий басейн з рідиною, і коли вони зближуються, поверхневий натяг басейнів з'єднується, утворюючи годинну скляну смугу розплавленого матеріалу між сторонами насіння та подачі. .

Скручуючи дві сторони в протилежні сторони, рідкий зразок ефективно «перемішується», щоб забезпечити рівномірний розподіл матеріалу в зоні розплаву. Потім пробу повільно опускають через сфокусований круг світла, що дозволяє вузькій зоні розплаву прогресивно плавити, перемішувати і твердне в напрямку подачі зразка.

"Для матеріалів з низьким тиском пари ми можемо вирощувати кристали зі швидкістю один міліметр на годину", - сказав Лю. "Ми можемо використовувати техніку на різних матеріалах, але ми завжди починаємо з фазової діаграми (своєрідної карти зростання), щоб визначити, чи можливо це. Ми не можемо вирощувати кристали з високим тиском пари чи можуть бути токсичними за допомогою цього методу".

Розчин / ріст потоку

Хоча інші три методи добре працюють на матеріалах, де відомий кристалічний результат, дослідники також намагаються виявити та виростити монокристали нових

бінарних, потрійних, четвертинних чи вищих сполук. У багатьох випадках матеріали в цих сполуках не плавляться конгруентно, тобто вони не плавляться при одній температурі.

"Ріст рішень надзвичайно багатогранний, і ви часто можете оптимізувати та швидко проходити його", - зазначив фізик лабораторії Еймса і професор Пол Кенфілд. "Загалом, він не дає тобі великого кристала, але для основних фізичних вимірювань щось між міліметром і сантиметром є більш ніж адекватним".

На практиці сполуки для цільового кристала поєднуються з матеріалом, який буде служити розчином, в якому кристалічна сполука буде розчинятися. Наприклад, щоб виростити кристал сурми церію з розчину олова або флюсу, ви можете почати з чотирьох відсотків кожного з Ce і Sb з іншими 92 відсотками Sn.

Матеріали переходять у тигель "зростання", який поєднується з тигелем "улов". Потім вони закриваються в силікатну трубку. Збір трубки поміщається в піч і нагрівається, щоб усі елементи плавилися. Потім температуру знижують ближче до точки плавлення елемента розчину, дозволяючи формуватися цільовому кристалу. У прикладі потоку Ce-Sb в потоці Sn початкова температура становить приблизно 1000 градусів Цельсія, потім знижується до 600 градусів.

Щоб потім відокремити рідку олово від кристала Ce-Sb, пробірку виймають з печі та негайно поміщають у центрифугу, яка віджимає решту рідкого олова в тигелі, залишаючи кристал позаду. Центрифуга подає в 100 разів більше сили простого гравітаційного декантації, в результаті чого кристали "чистіші".

"Коли ви розробляєте нові матеріали, вам потрібно ознайомитись із інгредієнтами та технікою, що є під рукою", - сказав Кенфілд. "З ростом розчину ми можемо переходити від перегляду надпровідників і ферромагнетиків, до окулярів, до квазікристалів - переходу від одного матеріалу до іншого - просто шляхом зміни елементів або умов зростання. За 20 років тут ми закриваємося на 10 тис. різних приростів".

3.2 Оптичні властивості $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) та $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO)

$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) і $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO) є цікавими матеріалами для різних оптичних пристроїв включаючи оптичну обробку даних. Вони - тісно пов'язані між собою і мають досить схожі властивості. Вони мають цікаві особливості для запису голографії в реальному часі а також для відтворення.

Зокрема, BSO та BGO використовувались для інверсії інтенсивності в реальному часі, віднімання та кореляції зображень за допомогою чотирьох методів змішування хвиль. Ці матеріали мають один і той же об'ємно-центровану структуру, належать до групи сілленіта з γ фази Bi_2O_3 . В останні роки зростає академічний і технологічний інтерес до стеклов, що містять ферроелектричні кристали і ферроелектричну кераміку як

нелінійних оптичних матеріалів .

Кристали з номінальною хімічною формулою $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$, де М - Si, Ti, Ge, Mn або якийсь інший чотиривалентний іон або їх комбінація відомі як силеніти. Ларс Гунар Сіллен розкрив $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 1941 в Дуранго, Мексика, і остання ціла група була названа на його честь. Усі сполуки зі структурою $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ кристалізуються в кубічну систему з I_{23} космічною групою. Оксид кремнію вісмуту (BSO) завдяки фотопровідним та електрооптичним властивостям знайшов застосування в ряді технологічно важливих оптичних пристроїв. Він продемонстрував унікальні властивості для використання в Pockels Readout Optical Memories (PROM) . Як матеріал, що володіє найвищою чутливістю до світловідбиття, він знайшов застосування в голографічному сховищі для читання-запису з відповідною високоякісною реконструкцією зображення, інтерферометрією в реальному часі, посиленням зображення, тощо. $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ також належить до сімейства ізоморфних сполук, які могли б знайти широке застосування в інтегрованій оптиці. Ці додатки вимагають найсуворіших вимог щодо оптичної якості матеріалу, включаючи однорідність показника заломлення, рівномірність оптичної щільності та звільнення від дефектів розсіювання світла, таких як включення.

Кристал $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ виробляється в основному методом Чохральського, але останнім часом також методом Брідгмана.

Внутрішні дефекти, такі як серцевина, смуги та включення, з'являються під час росту кристалів, погіршуючи їх оптичну якість і, таким чином, вимагають засобів для їх усунення. Метою досліджень, представлених тут, було отримання високоякісних монокристалів та визначення їх оптичних властивостей.

Оксид германію вісмуту або германат вісмуту - це неорганічна хімічна сполука вісмуту , германію та кисню . Найчастіше термін відноситься до сполуки з хімічною формулою $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) з кубічною кристалічною структурою евліпину , що використовується в якості сцинтилятора . (Термін може також стосуватися іншого з'єднання з формулою $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, електрооптичного матеріалу зі структурою силеніту та $\text{Bi}_2\text{Ge}_3\text{O}_9$.)

Германат вісмуту має високі електрооптичні, що робить його корисним у нелінійній оптиці для побудови клітин Pockels , а також може використовуватися для фоторефракційних пристроїв для ультрафіолетового діапазону.

Кристали $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ є п'єзоелектричними , виявляють сильні електрооптичні та акустооптичні ефекти та знаходять обмежене використання у галузі кристалічних осциляторів та пристроїв SAW . Монокристалічні стрижні та волокна можна вирощувати шляхом плаваючої зони із стрижня суміші оксиду вісмуту та оксиду германію . Кристали

прозорого та коричневого кольору.

Кристали БГО та подібних сполук BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, оксид кремнію вісмуту, силеніт) та ВТО ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) є світловідбивними та фотопровідними. Кристали BGO і BSO – ефективні фотопровідники з низькою темною провідністю. Вони можуть використовуватися в електрооптичних додатках, таких як оптичний PROM, просторові модулятори світла PRIZ, запис голограми в реальному часі, корелятори та системи адаптивного виправлення ультракоротких лазерних імпульсів, а також у волоконно-оптичних датчиках для електричних і магнітних полів. Хвильові структури дозволяють рівномірно освітлювати в широкому спектральному діапазоні. Тонкоплівкові силенітові структури, які можуть бути осаджені, наприклад, розпиленням, мають широкий спектр потенційного застосування. Кристали BSO використовуються в оптично адресованих просторових модуляторах світла і в рідкокристалічних світлових клапанах. Оптична активність ВТО значно менша, ніж BGO та BSO. На відміну від дещо схожих перовскітів, силеніти не є фероелектриками. Матеріали можуть знайти застосування в оптиці з поетапним масивом.

Під час розпилення ціль потрібно підтримувати нижче 450°C , оскільки в іншому випадку тиск пари вісмуту виводить композицію зі стехіометрії, але вище 400°C , утворюючи п'єзоелектричну γ фазу.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛІВ ГЕРМАНО- І СИЛІКОСЕЛЕНІТІВ.

Широке використання у пристроях акусто- та оптоелектроніки одержали кристали із структурою сілленіту. Експериментальні дослідження сілленітів присвячені, в основному, вивченню їх п'єзоелектричних, електрооптичних та фотоелектричних властивостей.

Значно менше уваги приділяється вивченню діелектричних характеристик сілленітів. Зрозуміло, що необхідне всебічне вивчення матеріалу, оскільки, не дивлячись на широке практичне використання та широкі експериментальні дослідження, фізична природа НВЧ властивостей сілленітів не з'ясована. З другого боку, являє інтерес вивчення можливостей практичного використання у НВЧ пристроях електромеханічно керуємих елементів з цих п'єзоелектричних кристалів, що мають низьке НВЧ поглинання, високу діелектричну проникність і термостабільність. Дуже важливо також вивчення можливості модифікації сілленітів шляхом введення домішок для поліпшення їх діелектричних характеристик та отримання необхідних для НВЧ застосувань властивостей.

Нижче наводяться результати досліджень діелектричних характеристик в області надвисоких частот чистих і легірованих кристалів германосілініту. У якості домішків використані такі сполуки: AlPO_4 ; MnPO_4 ; GaPO_4 ; V_2O_5 ; Ga_2O_5 .

У діапазоні НВЧ звичайні хвильоводні методи вимірювання втрат виявляються непридатними, якщо у досліджуваних діелектриках $\text{tg}\delta < 10^{-4}$. Висока проникність сіленітів дозволила використати метод діелектричного резонатора з основним типом коливань ТЕ. При цьому не потребується металізація зразків, що важливо, оскільки дозволяє уникнути додаткового забруднення кристалу матеріалом електродів при нанесенні останніх, а також відхилень, що пов'язані з інжекцією дірок та електронів з електродів. Похибка вимірювання діелектричної проникності цим методом складає $\epsilon \leq 3\%$, а похибка вимірювання $\text{tg}\delta \leq 15\%$, при еталонізації похибка вимірювання знижується у два рази. Однак, відносні вимірювання діелектричної проникності та витрат фіксуються з високою точністю, що обумовлено точністю вимірювання частоти ($f/f < 0,1\%$), що є важливим при детальному дослідженні планованої залежності комплексної діелектричної проникності.

Відома високотемпературна кубічна модифікація окису вісмуту - Bi_2O_3 (сіленіт) при введенні у каркас структури малих кількостей іонів Ge, Ti, Si, стає стійким при нормальних температурах і кристалізується в ОЦК решітці групи 23. Разом з тим, згідно літературним даним, у монокристалах сіленіту досить висока концентрація дефектів (10^{19} — 10^{20}см^{-3}) за рахунок вакансій іонів Ge(Si, Ti), що повинно суттєво відбиватися на властивостях кристалів, у тому числі на значенні НВЧ втрат. Має великий інтерес з'ясування ролі дефектів і можливості зменшення їх шляхом легірування.

Діелектричні характеристики високодобротних НВЧ матеріалів вимарюються, як правило, резонансними методами. Вимірюваними характеристиками є частота, що визначається діелектричною проникністю та геометричними розмірами, у першому наближенні $D=f/C$ ϵ ; добротність, у першому наближенні $Q=1/\text{tg}\delta$ та температурний коефіцієнт частоти, для великих ТКЕ у першому наближенні $\text{TK}\epsilon = -2$ ТКч. Тому ми будемо користуватися термінологію вимірюваних характеристик, маючи на увазі, що вимірювання проводяться через посередництво резонансного діелектричного елемента.

У літературних джерелах існують суттєві розбіжності відносно діелектричних характеристик сіленітів [17-22]. До того ж у діапазоні НВЧ сіленіти практично не досліджені.

Треба відзначити, що розбіжність літературних даних відносно значення діелектричної проникності, скоріш за все, обумовлена наступним. У літературі наводяться дані про значення діелектричної проникності (ϵ) і тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$).

$\text{tg}\delta$) для частот, які розташовані в області п'єзорезонансів для звичайних при таких вимірюваннях геометричних розмірах зразків. Не врахування цих обставин веде до некоректних результатів, оскільки в області п'єзорезонансів ϵ и $\text{tg}\delta$ змінюються у широких межах.

Нами виконані дослідження ϵ и $\text{tg}\delta$ сіленітів як нижче, так и вище частот п'єзорезонансів. Вимірювання виконані на частотах $5 \cdot 10^4$ Гц та 10^8 Гц за допомогою вимірювачів добротності ВМ-560 і Е4-11. Похибка вимірювань проникності не перевищує 2%, а $\text{tg}\delta$ – 7%. Визначені діелектричні параметри наведені у таблиці 1, де для порівняння наведені дані різних літературних джерел.

Таблиця 4.1 - Діелектричні характеристики за даними різних авторів.

Джерело	Ця робота				[21]		[19]		[22]		[20]	
Кристал	ϵ_T	$\text{tg}\delta$ 104	ϵ_S	$\text{tg}\delta$ 104	ϵ	$\text{tg}\delta$ 103	ϵ	$\text{tg}\delta$ 103	ϵ	$\text{tg}\delta$	ϵ_T	ϵ_S
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	43	5.5	40	4.5	40	3.5	140	0.04	-	-	45	39
$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	46	9	42	4.5	56	1.5	160	0.06	43	-	49	43

Дані дійсного дослідження і роботи [20] наведені для частотних областей до и після п'єзозатиснення. В інших роботах частоти, на яких проводились вимірювання не зазначені. Слід відзначити, що монокристали різних виробників, спостерігається деякий розкид діелектричних параметрів, як на низьких частотах, так и у НВЧ діапазоні. Різниця у значеннях діелектричної проникності сягає 5%, а діелектричних втрат – 15...20% у НВЧ діапазоні и 100% на частоті 1 МГц. Значний розкид, певне, є наслідком дефектності та відхилень стехіометрії у цих кристалах. Рости відхилення від стехіометрії складу типові для сіленітів [69]. У такому разі, можна було очікувати виникнення релаксаційної поляризації у таких дефектних кристалах, проте характерні максимуми $\text{tg}\delta$, на низьких частотах у області 300-500К не спостерігаються. У всьому дослідженому інтервалі температур температурний коефіцієнт діелектричної проникності $\text{TK}\epsilon > 0$.

Оскільки вклад релаксаційної поляризації незначний и дисперсія діелектричної проникності в сіленітах не спостерігається, можна припустити малі діелектричні втрати та збереження $\text{TK}\epsilon > 0$ на надвисоких частотах.

Надвисокочастотні діелектричні характеристики сіленітів нами досліджені методом діелектричного резонатора – на зразках циліндричної форми з основним $\text{TE}_{01\delta}$ типом коливань у стандартних прямокутних хвильоводах. Монокристали вивчались у діапазоні частот 4-40 ГГц и інтервалі температур 80-500К рис.4.1.

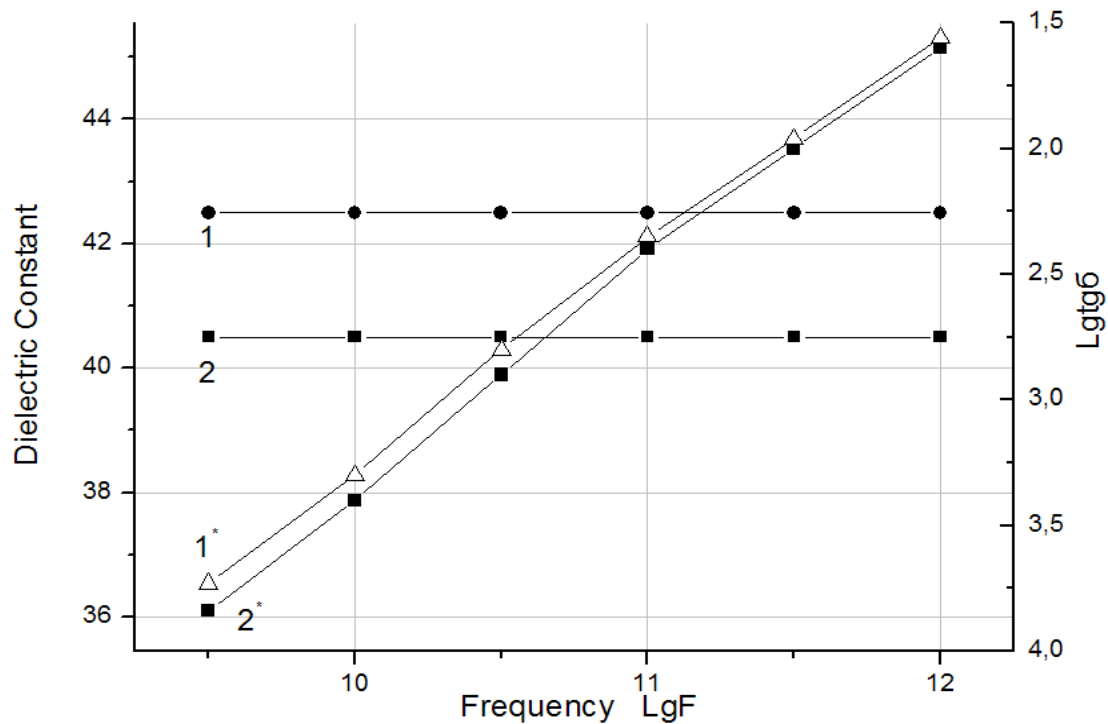


Рисунок 4.1 - Частотні залежності ϵ и $\text{tg}\delta$ монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.
1,2 - ϵ ; 1*, 2* - $\text{tg}\delta$.

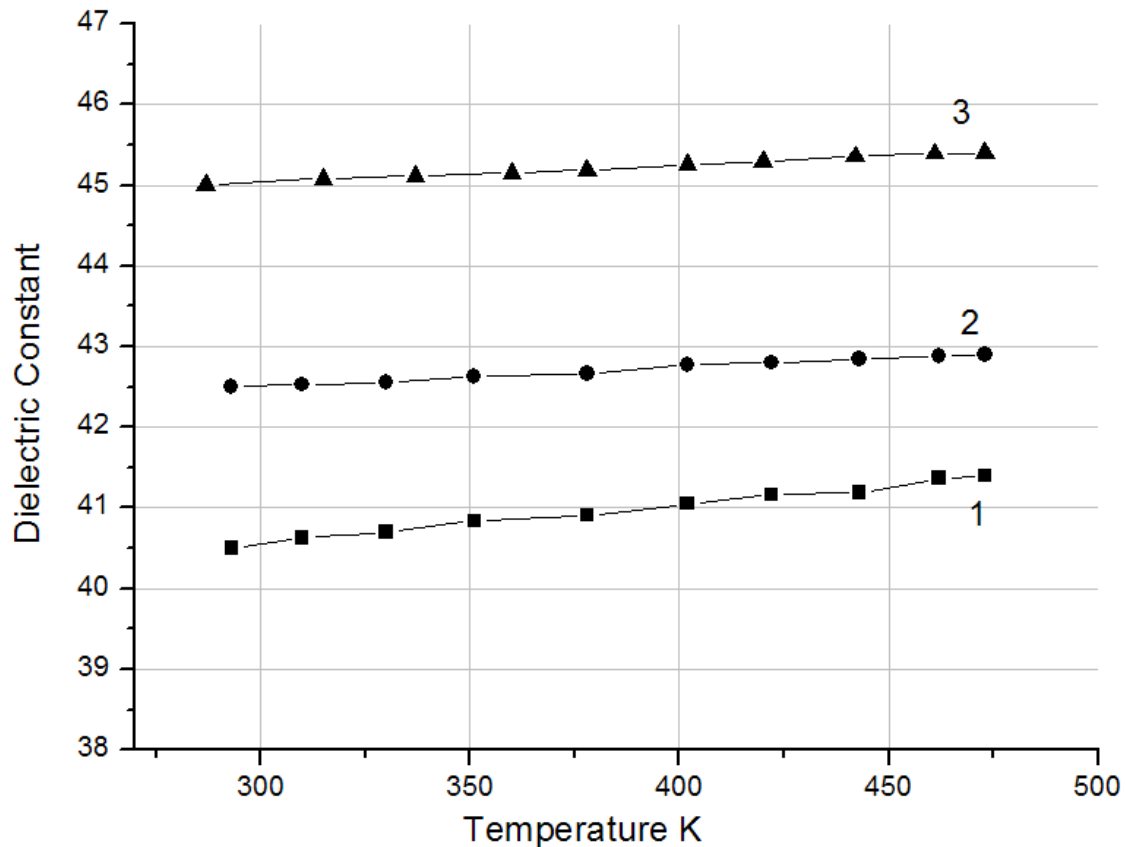


Рисунок 4.2 - Температурні залежності діелектричної проникності монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ на частоті 9.6 ГГц.

Температурний хід діелектричної проникності досліджених монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ показано на рис. 4.2.

Температурні коефіцієнти діелектричної проникності $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ та $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ близькі між собою і складають близько $+40 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. У $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, температурна залежність діелектричної проникності значно більша і складає $+110 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

У всіх досліджених монокристалів НВЧ втрати в області кімнатних температур виявились низькими і незначно різняться між собою, складаючи $\text{tg}\delta = (4-5)10^{-4}$.

За своїми діелектричними характеристиками сіленіти наближаються до монокристалів «жорстких» сегнетоелектриків LiNbO_3 та LiTaO_3 .

Поєднання у кристалах сіленітів високої діелектричної проникності і малих НВЧ втрат то позитивного ТК ϵ у НВЧ діапазоні являє значний практичний інтерес.

Температурні залежності НВЧ втрат досліджених сіленітів показані на Рис. 4.1-4.5.

Як і в більшості іонних кристалів, величина $\text{tg}\delta$ із зростанням температури поступово підвищується (в інтервалі 300-500оК), що свідчить про звичайну для іонних кристалів фундаментальну дисперсію в ІК області. Фундаментальні смуги ІК-поглинання за даними [70] лежать у дальній ІК-області в інтервалі 400-800 см⁻¹.

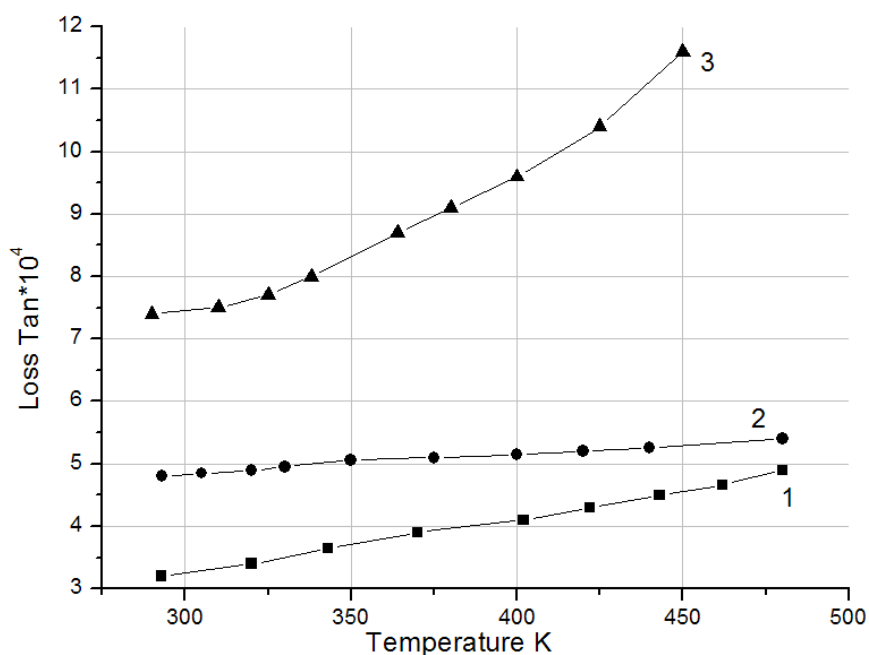


Рисунок 4.3 - Температурні залежності діелектричних втрат монокристалів Bi₁₂GeO₂₀, Bi₁₂SiO₂₀ та Bi₁₂TiO₂₀ на частоті 9.6 ГГц.

Значний науковий, а можливо і практичний інтерес представляє низькотемпературне поведіння НВЧ поглинання цих монокристалів.

Поблизу 100K у Bi₁₂GeO₂₀ нами виявлений максимум НВЧ поглинання, величина і температурне положення котрого декілька змінюється у зразках різного походження (Рис.4.5). У Bi₁₂SiO₂₀ нижче 200K спостерігається монотонне зростання НВЧ втрат впритул до 77K (рис.4.4). У цьому кристалі максимум поглинання, мабуть теж існує і розташований нижче 77K. Істотно відрізняється температурне поведіння tgδ у кристалі титаносіленіта Bi₁₂TiO₂₀ (рис.4.3). У цьому кристалі НВЧ поглинання поблизу 100K починає різко знижуватись і при 77K досягає дуже малого значення (tgδ = 1.3•10⁻⁴). Цілком імовірно, природа аномального поведіння НВЧ поглинання у Bi₁₂GeO₂₀ і Bi₁₂SiO₂₀ однакова. Немає переконливих даних на користь того, що виявлені аномалії пов'язані з якимось фазовим переходом. Навпаки, у роботі [74] зроблено висновок про відсутність у сіленітах в інтервалі 77—300K фазових переходів на основі того, що п'єзомодулі цих сполук не залежать від температури у вказаному інтервалі. Природа низькотемпературних аномалій НВЧ поглинання остаточно не з'ясована, але одержані дані дозволяють висловити деякі припущення.

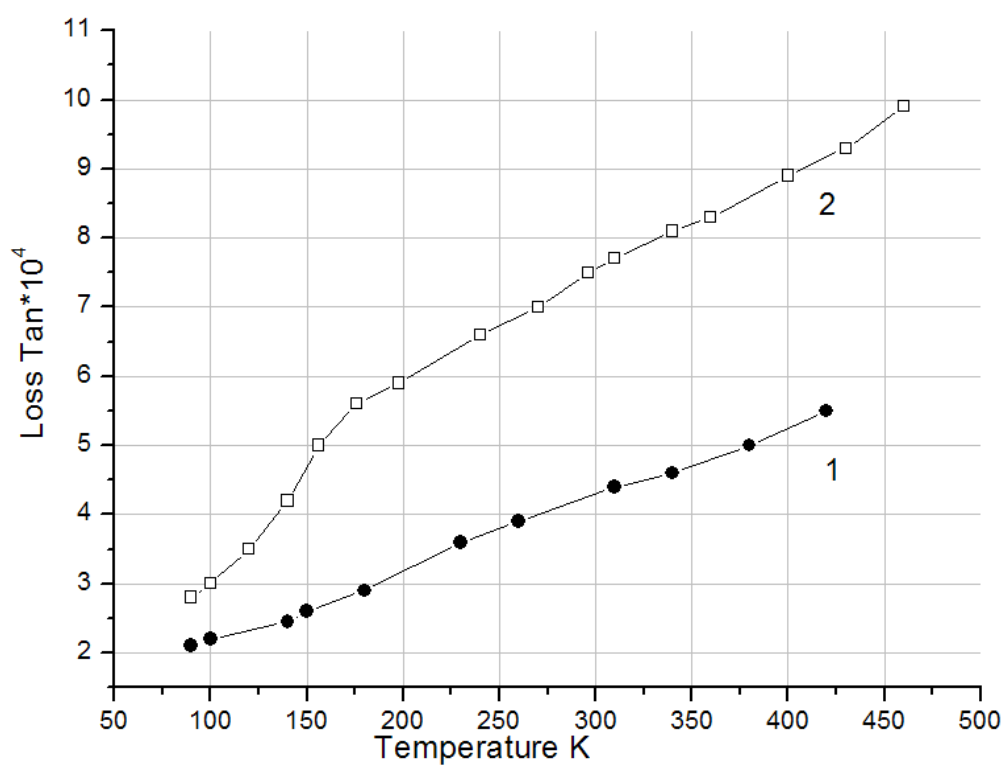


Рисунок 4.4 - Температурні залежності діелектричних втрат монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, На частоті 9.7ГГц та 20ГГц.

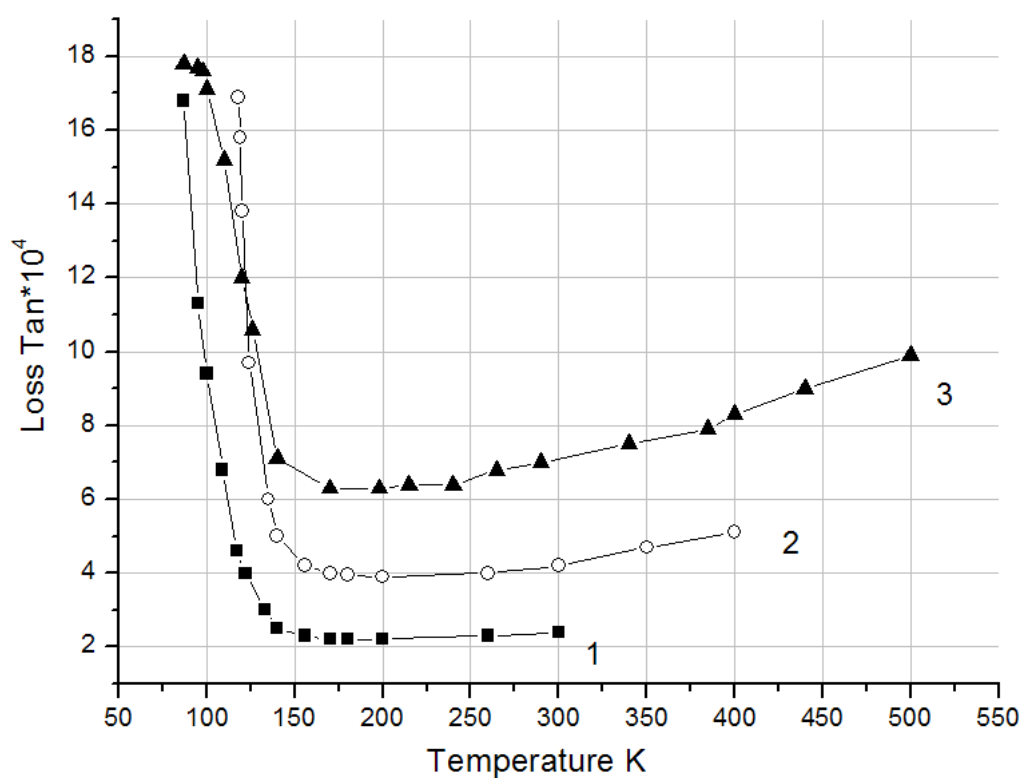


Рисунок 4.5 - Температурні залежності діелектричних втрат монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, 1 – 4.5 ГГц, 2 – 9.6ГГц, 3 – 20ГГц.

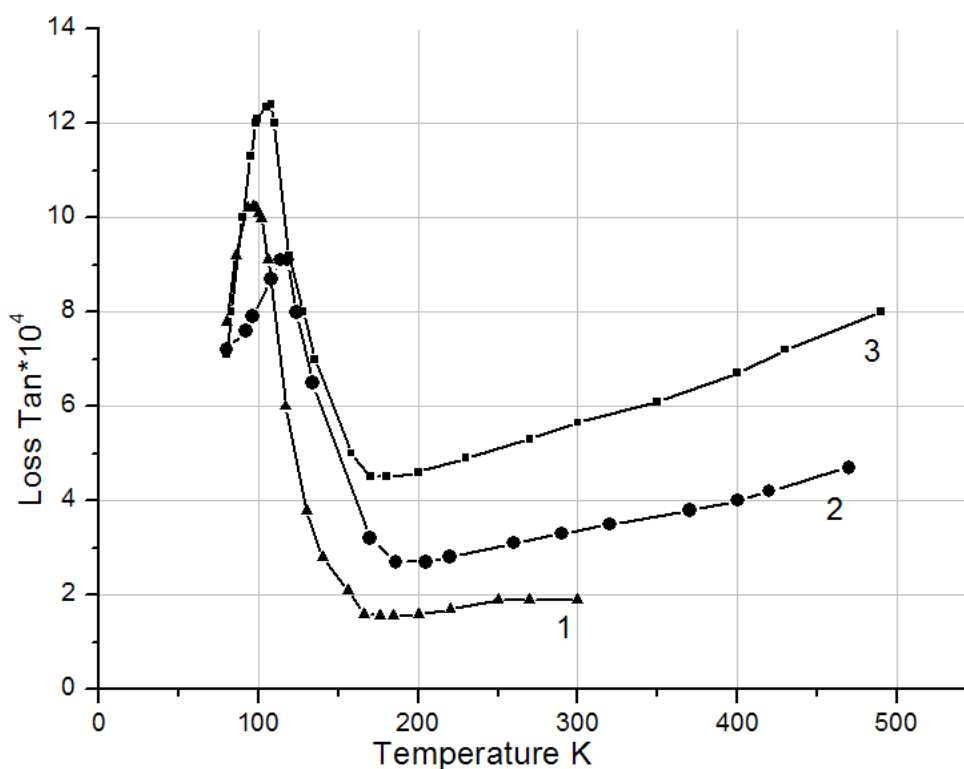


Рисунок 4.6 - Температурні залежності діелектричних втрат монокристалів $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, 1 – 4.5 ГГц, 2 – 9.6 ГГц, 3 – 20 ГГц.

У ряді робіт обговорюються аномалії поглинання ультразвуку у сіленітах у області низьких температур [23-24]. У роботі [24] зроблена спроба з'ясування зв'язку аномалій поглинання ультразвуку з поляризаційними процесами у цьому діелектрику. Однак в області аномалії не знайдено скільки не будь помітних відхилень у залежності $\epsilon(T)$ і $\text{tg}\delta(T)$, що спроможні були б кількісно пояснити аномалії. У [25] максимум поглинання простежений до 1.5 ГГц, з'ясовано, що з підвищенням частоти максимум поглинання значно розширюється в сторону високих температур і його величина зростає. Це привело авторів до висновку про релаксаційну природу аномалій.

В роботі [26] досліджено поглинання ультразвуку у кристалах з малими домішками Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Pr_2O_3 , ZnO . При введенні цих оксидів максимум поглинання ультразвуку зменшується або зникає повністю. Цікаво, що термообробка в вакуумі зразків, допированих хромом, призвела до зменшення максимуму більш ніж на половину, а подальша термообробка у кисневій атмосфері відновила первісну величину затухання ультразвуку. Термообробка чистого монокристала у вакуумі і кисні не змінила величину поглинання. В роботі також підтверджується релаксаційна природа аномалій.

Діелектричні характеристики $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ на частотах 102—104 Гц досліджені в роботі [26]. При температурі 20—26 К знайдені максимуми діелектричних втрат

релаксаційного походження. На нашу думку, знайдені нами аномалії НВЧ поглинання, низькочастотні максимуми діелектричних втрат [21] і аномалії поглинання ультразвуку мають єдину природу і носять релаксаційний характер. На користь цього можна привести деякі дані.

Розрахунок енергії активації по результатам [23] дає величину $U = 0.04$ еВ, при цьому величина предекспоненційного множника $\tau = 3.9 \cdot 10^{-13}$. Знаючи величину потенціального бар'єра, легко розрахувати температури, при яких треба очікувати з'явлення релаксаційних максимумів на заданих частотах.

З виразу $\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right)$ при умові $\omega_1 \tau_1 = \omega_2 \tau_2$ одержуємо :

$T_2 = T_1 U \left[U - (\ln f_2 - \ln f_1) kT \right]^{-1}$; задаючи частоти, одержуємо шукомі температури максимумів поглинання на заданих частотах.

В таблиці 4.2 наведені розрахункові по даним [23] температури релаксаційних максимумів, а також експериментальні температури максимумів поглинання ультразвуку одержані у роботі [24] і температури максимумів НВЧ поглинання одержані у нашому експерименті. Досить добра згода температурних положень максимумів, розрахованих по даним [21].

Таблиця 4.2 - Експериментальні і розрахункові значення температур, відповідаючих релаксаційним максимумам і максимумам поглинання ультразвуку.

Частота Гц	розрахунок Т,К	[24] Т,К	[25] Т,К	дійсна робота
25 106	47.4	48	47	—
45 106	50.4	—	49	—
90 106	54.5	—	54	—
600 106	70	67	—	—
800 106	73	70	—	—
4 109	102	—	—	92

9.6 109	124	—	—	102
20 109	150	—	—	112

експериментальних даних і результатів нашої роботи може свідчити про те, що всі ці максимуми мають єдину природу. Температурна і частотна поведінка максимумів підтверджує їх релаксацийний характер, обумовлений найбільш імовірно дефектами структури. Різними авторами в кристалах типу сіленіта встановлено наявність катіонних вакансій кременя або германія з концентрацією 10^{19} — 10^{20} см⁻³. Наявність катіонних вакансій в діелектрику звичайно приводить до виникнення релаксацийних процесів з енергією активації, що перевищує більш ніж на порядок спостерігаєму у сіленітах. Незвично низька енергія активації і розповсюдження релаксацийного процесу у область надвисоких частот вказує на дуже малі переміщення і малу інерційність зарядів, відповідальних за виникнення процесів, що приводять до виникнення низькотемпературного максимуму НВЧ поглинання. Не з'ясовано, які саме структурні групи дають внесок в релаксацийні втрати, але можна припустити, що релаксацийні процеси в сіленітах пов'язані з електронною підсистемою кристала. Імовірно, що це релаксація електронної щільності у області вакансій і дефектів, утворюючих місцеві порушення електронейтральності.

Характерною особливістю кристалів типу сіленіта являється значна ростова дефектність. Відхилення складу ростучого кристала від стехіометрії обумовлює створення вакансій, дефектів і внутрішніх напружень, що інколи приводить до появи мікротріщин. Дефекти структури у всякому їх проявленні, підвищують НВЧ втрати. Знизити дефектність по кисню можна відпалюванням. Але, як показав наш експеримент, відпалювання на повітрі не дає помітного зниження НВЧ втрат, що свідчить про незначну аніонну дефектність. При підвищенні температури відпалювання спостерігається навіть деяке підвищення НВЧ утрат, що імовірно пов'язане із створенням додаткових катіонних вакансій при температурах, близьких до температур плавлення сіленітів (найбільш імовірно це за рахунок вісмуту, як найбільш летючого).

При вивченні модифікованих сіленітів шляхом введення домішків для поліпшення їх діелектричних характеристик та отримання необхідних для НВЧ застосувань властивостей, отримані наступні результати.

Введення раніше перелікованих домішків значно відбилося на діелектричних характеристиках кристалів. Легірування складів переліченими домішками, привело до

продавлення максимуму низькотемпературного поглинання. Причому у області 90-150 К в деяких кристалах на залежності $\text{tg}\delta$ спостерігається дуже розмиті максимуми. У всіх випадках дещо підвищувалась діелектрична проникність, причому найбільше підвищення спостерігається при введенні оксиду галія. Порівняльні характеристики чистого і легірованого кристалів наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Характеристики $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ з домішками.

№	Домішок	ϵ	F ГГц	$\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$	F ГГц	$\text{tg}\delta \cdot 10^{-3}$	ТК ϵ
1	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	41.7	9.6	4.2	20	1.3	+110
2	Ga_2O_3	43.5	9.3	4.4	20	6.3	+40
3	GaPO_4	42.4	9.4	4.2	20	1.1	+52
4	MnPO_4	42.6	9.5	3.8	20	2.0	+40
5	AlPO_4	42.6	9.5	4.2	20	1.1	+57
6	V_2O_5	42.1	9.4	4.4	20	1.2	+58
7	V_2O_5	42.2	9.5	4.2	20	1.2	+58

Слід відзначити, що введення у склад окису галію та ортофосфату марганцю привело до різкого зростання $\text{tg}\delta$ на НВЧ майже на порядок, при цьому збільшилася і залежність $\text{tg}\delta$ від температури. Пропалювання на повітрі кристала легірованого Ga_2O_3 , що має найбільш високий $\text{tg}\delta$, привело до зниження $\text{tg}\delta$ у два рази в азотних температурах, але у області кімнатних температур $\text{tg}\delta$ практично не змінився. Дещо змінився ТК ϵ без зміни значення при кімнатній температурі. У кристалах, що легіровані GaPO_4 , AlPO_4 , V_2O_5 $\text{tg}\delta$ практично не змінився порівняно з чистим германосіленітом. У всіх легірованих кристалах різко зросла термостабільність, ТК ϵ зменшився більше, ніж у два рази. Таким чином, легірування привело до послаблення релаксаційних процесів.

У публікаціях обговорюються вклади в діелектричну восприємність від вісмут-кисневих комплексів та кисневих тетраедрів центрованих іонів $\text{Ge}(\text{Si})$. Зроблено висновок, що вклад від вісмуткисневих комплексів у значенні діелектричної восприємності досягає 95%. У такому разі деяке зростання легірованих кристалів можна розглядати, як збільшення вкладу в діелектричну восприємність за рахунок компенсації

катионних вакансій. З цих же позицій можна пояснити і зниження ТКє як температурну компенсацію вкладів від вісмуткисневих комплексів та кисневих тетраедрів. На жаль, легірування на дало зниження НВЧ втрат і навряд чи можна розраховувати на суттєве зниження $\text{tg}\delta$ НВЧ. Однак, легіровані кристали сіленітів підвищеної термостабільності представляють інтерес для практичного використання у пристроях НВЧ.

Таким чином, нами виконані детальні дослідження НВЧ характеристик сіленітів, практично раніш невідомих у літературі. Як показують наші дослідження, сіленіти являють собою перспективні для НВЧ застосувань діелектрики, на основі яких може бути розроблено електрично керований діелектричний резонатор. Окрім сіленітів нами розпочаті дослідження НВЧ характеристик лангаситів і євлітинів. Попередні результати досліджень указують на те, що означені монокристали п'єзоелектриків також володіють НВЧ характеристиками придатними для використання у НВЧ приладах.

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО- ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛІВ ГЕРМАНО-І СИЛІКОСЕЛЕНІТІВ.	1. Широке використання у пристроях акусто- та оптоелектроніки.	Використовується для потенційного застосування в просторових модуляторах світла, акустичних лініях затримки та апараті для запису голограми.
	2. Дослідницька робота у вищих навчальних закладах	Відносно дешевий, цікавий в дослідженні.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні)товари/концепції конкурентів			W(слабкі сторони)	N(нейтральна сторона)	S(сильна сторона)
		Bi ₁₂ SiO ₂₀ (BSO)	Bi ₁₂ GeO ₂₀ (BGO)	Fe: LiNbO ₃			
1.	Кришталева структура	Кубічна, точкова група: 23	Кубічна, точкова група: 23	Трігональну, 3 м		+	
2.	Параметри решітки (осередки), Å	10,1	10,15	-	+		+
3.	Діапазон передачі, мкм	0,4-6	0.4-7	0,35 - 5,5			+
4.	Оптична активність, град / мм при 500 нм	42	41,5	-			+
5.	Щільність, г / см ³	9,15	9,2	4,64			+
6.	Діелектрична постійна	56	40	85 (e11) 30 (e33)	+		+
7.	Теплопровідність при 25 ° С	-	-	-	+		

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3– Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Дослідження температурних та частотних властивостей п'єзоелектричних кристалів германо- і силікосіленітів	Дослідженно методом діелектричного резонатора	Наявна	Доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Всі потрібні зразки були доступні для дослідження. Монокристали вивчались у діапазоні частот 4-40 ГГц и інтервалі температур 80-500K.				

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№	Показники стану ринку(найменування)	Характеристики
1.	Кількість головних гравців,од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од	1000 \$
3.	Динаміка ринку(якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу(вказати характер обмежень)	Зростання виробництва
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Потребує
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) %	50%

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№(п/п)	Потреба,що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Потреба у використанні у нових пристроях.	Дослідницькі, лабораторії	-	Точність вимірювання матеріалів

Таблиця 5.6 Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Потрібні люди з інженерною освітою	Науково-дослідні інститути
2.	Глобальна економічна криза	Проблема зниження продажів	Підвищення цін. Розробка кращого і більш дешевого методу.
3.	Потреба в ресурсах	Для появи продукту потрібне технічне обладнання.	Укладання договорів з поставниками ресурсів та оренда приміщення для виготовлення

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливостей	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Розробити і виробити нові продукти .	Улучшення товара
2.	Попит	Зацікавленість в покращенні технології	Улучшення виробництва

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства(можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції олігополія	На ринку присутня дуже маленька кількість фірм.	Застосування нових технологій та залучення кваліфікованого персоналу.
2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	На Україні виробництв дуже мала кількість, в Європі більше.	Створити веб-сайт виробництва.
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які	Стежити за розробками конкурентів

	діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	
4.Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращити якість виробництва
5. За характером конкурентних переваг - не цінова	Ціна продукту висока.	Покращити виробництво товару.
6.За інтенсивністю - немарочна	Боротьба не стосується марки.	Рекламувати товар

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	ТОВ «Сілленіти	-	Товар продається постачальниками	Вимоги до якості	Замінники існують
Висновки	Інтенсивність висока, бо матеріал є науковим.	-	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним для клієнта	Обмежень немає

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентної спроможності.

№ п/п	Фактор	Обґрунтування (наведення чинників, що
-------	--------	---------------------------------------

	конкурентоспроможності	роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Ціна нижча ніж у конкурента
2.	Наявність наукових ресурсів	Для удосконалення продукції потрібні наукові ресурси.
3.	Якість розробки	Розрахунки мають бути без похибок
4.	Терміни виробництва	Необхідно все виконувати вчасно

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Ціна	16			+				
2	Наявність наукових ресурсів	10						+	
3	Якість розробки	20					+		
4	Терміни виробництва	12					+		

Таблиця 5.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: гарні робочі характеристики, надійність	Слабкі сторони: ціна
Можливості: Покращити виробництво матеріалу та знизити витрати.	Загрози: відсутність кадрів; поява інших конкурентів.

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
---	---	-----------------------------------	-------------------

1.	Пошук нових наукових технологій для виготовлення.	60%	1,5 роки
2.	Пошук нових наукових технологій для виготовлення.	50%	1 рік

Обрано альтернативу № 2

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 5.14– Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Дослідницькі лабораторії	Готові	Високий	Низька	Складна
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.					

Таблиця 5.15-Визначення базової стратегії розвитку.

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Пошук нових способів виготовлення	За рахунок пошуків подібнимого виготовлення	Можливість досягнення подібних результатів	Стратегія лідерство на якості вимірювання.

Таблиця 5.16-Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів,	Чи буде компанія копіювати основні	Стратегія конкурентної поведінки
---	--	---	------------------------------------	----------------------------------

		або забирати існуючих у конкурентів?	характеристики товару конкурента, і які?	
1.	Ні	Так	Ні	Зайняти перші ряди. Обійти конкурентів.

Таблиця 5.17-Визначення стратегії позиціонування.

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Якість	Лідерство в новизні	Якість високого рівня	Оптимальне співвідношення ціна/якість
2.	Точність	Лідерство в характеристиках	Висока точність	

5.5.Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.18-Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Покращення точності характеристики	Збільшити точність	Зробити більш точні дослідження і якість вимірювання.
2.	Висока якість	Висока якість	Висока якість

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
--------------	----------------------

I. Товар за задумом	Розроблення електрично керованого діелектричного резонатора на основі селенітів.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1.Точність
	2.Довговічність
	3.Якість
	Якість: висока
	Пакування: -
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія.
	Після продажу: підтримка
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентні права.	

Таблиця 5.20-Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	-	200-900\$	2000 і вище	150-500\$

Таблиця 5.21-Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Заказ товару в інтернет магазині	Встановлення контакту з клієнтами, інформування про характеристики матеріалу, зберігання	Канал з нульового рівня	Виробник збуває свою продукцію покупцеві

Таблиця 5.22-Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Вибір надійного продукту	Реклама та сайт	Якість і хороші ціни	Показати перевагу продукту	Показ працювання матеріалу.

ВИСНОВКИ

П'єзоелектрика є цікавою областю нанотехнологій, і вже є випробування, що проводяться поза лабораторій, щоб спробувати використовувати цю форму влади. У багатьох місцях, в тому числі в японському метро, танцполах по всьому світу і футбольних стадіонах, інженери вже створили п'єзоелектричні підлоги, які використовують великий крок, щоб знизити потребу в електроенергії з мережі. Якщо в наступні роки нам пощастить, п'єзоелектрику стане ще одним зброєю, яке ми можемо використовувати, щоб зменшити нашу залежність від викопного палива і отримати необхідну нам енергію.

П'єзоелектричні кристали також широко використовуються в схемах фільтрів з високою вибірковою. Такі кристали мають дуже великим значенням добротності Q , і тому особливим чином вирізані кристалічні пластинки можуть бути включені в ланцюг спільно з індуктивностями і ємностями для отримання фільтрів з надзвичайно високою вибірковою. Такі фільтри вживаються в системах з високочастотної несучої і в коаксіальних системах для поділу декількох одночасних телефонних переговорів, що передаються по одній парі проводів.

Використання в НВЧ-мікроелектроніці резонансних явищ з діелектриках з великою діелектричною проникністю сприяє створенню високоефективних частотно-виборчих пристроїв з діелектричними резонаторами, застосування яких суттєво знижує вартість, масо-габаритні показники та покращує енергетичні характеристики апаратури.

Продовжується інтенсивний пошук нових, удосконалення відомих композицій та технологій для покращання характеристик НВЧ діелектриків або їх здешевлення, оскільки при виборі матеріалу окрім електричних характеристик важливим фактором залишається економічна доцільність застосування того чи іншого діелектрика.

Виконані детальні дослідження НВЧ характеристик п'єзоелектричних монокристалів, практично раніш невідомих у літературі. Показана їх перспективність для НВЧ застосувань, на їх основі може бути розроблено електрично керовані діелектричні НВЧ прилади.

В данній роботі було досліджено НВЧ характеристики сіленітів. Як показують наші дослідження, сіленіти являють собою перспективні для НВЧ застосувань діелектрики, на основі яких може бути розроблено електрично керований діелектричний резонатор. Окрім сіленітів нами розпочаті дослідження НВЧ характеристик лангасітів і євлітинів. Попередні результати досліджень указують на те, що означені монокристали

п'єзоелектриків також володіють НВЧ характеристиками придатними для використання у НВЧ приладах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сазанов Д.М., Антенны и устройства СВЧ.-Москва"Высшая школа",1988.-150с
2. I. M. Reaney and R. Uvic, Talking microwaves: A review of ceramics at the heart of the telecommunications network// International Ceramics, Issue 1, 2000, pp.48-52.
3. Scrantom, C.Q. and Lawson, J.C., "LTCC Technology: Where we are and where we're going to", Proceedings of the IEEE MTT-S International Topical Symposium for Wireless Applications, Feb. 1999, pp 193-200
4. R. L. Keusseyan, D. I. Amey, S. J. Horowitz, "New Low Cost Interconnection Materials for High Frequency MCM Applications ", Proc. 1998, Intl. Conf. On Multichip Modules, Denver CO.
5. А.И.Абраменко, И.И.Бородуленко и др. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в перестраиваемых полупроводниковых генераторах.//Обзоры по электронной технике. Серия 1, вып.5.1988г.
6. А.С.№ 1259370,22.05.1986 В.И.Молчанов, Ю.М.Якименко, В.М.Пашков, С.В.Пятчанин, С.А.Селиванов Перестраиваемый СВЧ фильтр.
7. Bamford R, Kuo C P, Glaser R and Wada B K Long stroke precision PZT actuator// Conf.—Collection of Technical Papers , Structures, Structural Dynamics, and Materials (New York: AIAA),1995, pp 3278–3284.
8. Hall S R and Prechtl E F Development of a piezoelectric servoflap for helicopter rotor control Smart Mater. Struct. 1996 5, 24-26.
9. Haertling G H Ultra-high-displacement actuator Am. Ceram.Soc. Bull. 1994,73 93–96.
10. Onitsuka K, Dogan A, Tressler J F, Xu Q, Yoshikawa S and Newnham R E 1995 Metal-ceramic composite transducer, the 'moonie' J. Intell. Mater. Syst. Struct. 6 447–55.
11. Dogan A, Uchino K and Newnham R E Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps 'cymbal' IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control 1997,v.44, pp. 597–605
12. A. Okaya and L.F. Barash, "The Dielectric Microwave Resonator", Proc. IRE, Vol. 50, pp. 2081–2092, October 1962.
13. Darko Kajfez and Piere Guillon, Dielectric Resonators, Artech House, Dedham, MA, 1986.
14. У.Мэзон, Пьезоэлектрические кристаллы и их применения в ультразвуке.- Москва,1952.-7с
15. Spittle, Peter. "Gas turbine technology" Rolls-Royce plc, 2003. Retrieved: 21 July 2012.

16. Marian W. Pospieszalski, "Cylindrical Dielectric Resonators and Their Applications in TEM Line Microwave Circuits", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-27, pp. 233–238, March 1979.
17. Литвин Б.Н., Шелдин Ю.В., Питовракова И.Е. Синтез и электрооптические свойства монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ -силленита. // Кристаллография. 1968.с.1106-1111.
18. Сафронов Г.М., Батог В.Н., Красилов Ю.И. и др. Некоторые физико-химические свойства силикатов и германатов висмута силленит типа. // Изв. АН СССР. 29. Сер. неорг. материалы. 1970. Т.6 с.284-287.
19. Kuwata J., Onoda M., Uchino K., Momyura S. Dielectric losses in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single Crystals. // J. Jap. Appl. Phys. 1981. V.20. No.8. pp.1609-1610.
20. Aldrich R.S., Hou S.L., Harvill M.L. Dielectric and Optical Properties of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. // J. Appl. Phys. 1971. V.42. pp.493.
21. Link J., Fontanella J. Temperature Variation of the Dielectric Properties of Bismuth Germanate and Bismuth Germanium Oxides. // J. Appl. Phys. 1980. V.51. No.8. pp.4352-4356.
22. Rehwald W. Anomalous Ultrasonic Attenuation in $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}(\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})\text{O}_{20}$ // J. Appl. Phys. 1973. V.44. No.7. pp.3017-3021.
23. Spencer S.G., Lenzo P.V. Ultrasonic Properties Bismuth Germanium Oxide. Appl. Phys. Lett. 1966, vol.9, No.8, pp.290-291.
24. Grevalt P.K., Lea M.J. Ultrasonic Attenuation in Pure and Doped $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ - J. Phys. C. Solid State. 1983, v.16, N2, pp.247-257.
25. Hyoungh Jung, Keun Ho Auh Crystal growth and piezoelectric properties of langasite $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ crystals // Materials Letters 41 1999 pp.241-246.